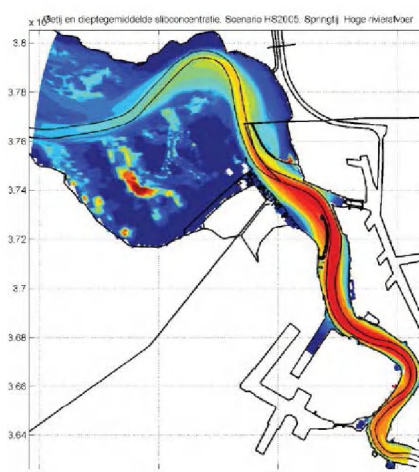


## Instandhouding Vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie



### LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid

## Actualisatierapport Finel 2D Schelde-estuarium

Achtergrondrapport A-26

01 oktober 2013

---

## Colofon

---

### **International Marine & Dredging Consultants**

Adres: Coveliersstraat 15, 2600 Antwerpen, België

Telefoon: + 32 3 270 92 95

Fax: + 32 3 235 67 11

Email: [info@imdc.be](mailto:info@imdc.be)

Website: [www.imdc.be](http://www.imdc.be)

### **Deltares**

Adres: Rotterdamseweg 185, 2600 MH Delft, Nederland

Telefoon: + 31 (0)88 335 8273

Fax: +31 (0)88 335 8582

Email: [info@deltares.nl](mailto:info@deltares.nl)

Website: [www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)

### **Svašek Hydraulics BV**

Adres: Schiehaven 13G, 3024 EC Rotterdam, Nederland

Telefoon: +31 10 467 13 61

Fax: +31 10 467 45 59

Email: [info@svasek.com](mailto:info@svasek.com)

Website: [www.svasek.com](http://www.svasek.com)

### **ARCADIS Nederland BV**

Adres: Nieuwe Stationsstraat 10, 6811 KS Amhem, Nederland

Telefoon: +31 (0)26 377 89 11

Fax: +31 (0)26 377 85 60

Email: [info@arcadis.nl](mailto:info@arcadis.nl)

Website: [www.arcadis.nl](http://www.arcadis.nl)

---

## Document Identificatie

---

|               |                                                                                                                                                                               |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Titel         | Actualisatierapport Finel 2D Schelde-estuarium                                                                                                                                |
| Project       | Instandhouding Vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie                                                                                                |
| Opdrachtgever | Afdeling Maritieme Toegang - Tavernierkaai 3 - 2000 Antwerpen                                                                                                                 |
| Bestek nummer | 16EF/2010/14                                                                                                                                                                  |
| Documentref   | I/RA/11387/12.100/GVH                                                                                                                                                         |
| Documentnaam  | K:\PROJECTS\11\11387 - Instandhouding Vaarpassen Schelde\10-Rap\Op te leveren rapporten\Oplevering 2013.10.01\A-26 - Actualisatierapport Finel 2D Schelde-estuarium_v2.0.docx |

---

## Revisies / Goedkeuring

---

| Versie | Datum      | Omschrijving       | Auteur | Nazicht       | Goedgekeurd |
|--------|------------|--------------------|--------|---------------|-------------|
| 1.0    | 23/05/12   | FINAAL             | G. Dam | B. Grasmeijer | B. Blik     |
| 1.1    | 31/03/2013 | Klaar voor revisie | G. Dam | B. Grasmeijer | B. Blik     |
| 2.0    | 01/10/2013 | FINAAL             | G. Dam | B. Grasmeijer | B. Blik     |

---

## Verdeellijst

---

|   |          |                   |
|---|----------|-------------------|
| 1 | Analoog  | Youri Meersschaut |
| 1 | Digitaal | Youri Meersschaut |





## **Actualisatie van het FINEL2d model van de Westerschelde**

ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid

Eindrapport

A26; 1630/U11274/GD/G

13 augustus 2013

Schiehaven 13G  
3024 EC Rotterdam  
Postbus 91  
3000 AB Rotterdam  
Nederland  
T +31 - 10 - 467 13 61

|                |                                                                                       |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Document titel | Actualisatie van het FINEL2d model van de Westerschelde                               |
|                | ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid |
| Verkorte Titel | Actualisatie FINEL model                                                              |
| Status         | Eindrapport                                                                           |
| Datum          | 13 augustus 2013                                                                      |
| Project naam   | Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid                 |
| Project nummer | 1630                                                                                  |
| Opdrachtgever  | Rijkswaterstaat Waterdienst, Vlaamse Overheid, Afdeling Maritieme Toegang             |
| Referentie     | A26; 1630/U11274/GD/G                                                                 |

|                    |                                                              |
|--------------------|--------------------------------------------------------------|
| Auteur             | Gerard Dam                                                   |
| Gecontroleerd door | Bart Grasmeijer (ARCADIS), Bram Blik, Marcel Taal (Deltares) |

## INHOUDSOPGAVE

|                                                             | Pag. |
|-------------------------------------------------------------|------|
| 1 INLEIDING                                                 | 4    |
| 2 ROOSTER OPTIMALISATIE EN REKENTIJDEN                      | 6    |
| 3 WATERBEWEGING: OPTIMALISATIE WATERSTANDEN                 | 11   |
| 3.1 Inleiding                                               | 11   |
| 3.2 Waterstanden                                            | 11   |
| 3.3 Conclusie                                               | 17   |
| 4 WATERBEWEGING: VALIDATIE OP STROOMSNELHEDEN               | 19   |
| 4.1 Bath                                                    | 19   |
| 4.1.1 Beschikbare metingen                                  | 19   |
| 4.1.2 Vergelijking met FINEL2d                              | 21   |
| 4.2 Plaat van Ossensisse                                    | 26   |
| 4.2.1 Beschikbare metingen                                  | 26   |
| 4.2.2 Vergelijking met FINEL2d                              | 27   |
| 4.3 Gat van Ossensisse/ Middelgat                           | 33   |
| 4.3.1 Beschikbare metingen                                  | 33   |
| 4.3.2 Vergelijking met FINEL2d                              | 33   |
| 4.4 Conclusie                                               | 37   |
| 5 WATERBEWEGING: VALIDATIE STROOMSNELHEDEN PUT VAN BORSSELE | 38   |
| 5.1 Beschikbare metingen                                    | 38   |
| 5.2 Vergelijking met FINEL2d                                | 38   |
| 5.3 Vergelijking met FINEL3d                                | 44   |
| 5.3.1 Modelopzet en modelinstellingen                       | 44   |
| 5.3.2 Resultaten                                            | 46   |
| 5.4 Conclusie                                               | 50   |
| 6 MORFOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN 1998-2002                    | 51   |
| 6.1 Basis instellingen                                      | 51   |
| 6.2 Optimalisatie van het erosie/sedimentatie patroon       | 52   |
| 6.3 Baggeren en storten                                     | 58   |
| 6.4 Import/export van de Westerschelde                      | 64   |
| 6.5 Kwaliteit van de resultaten                             | 64   |
| 6.6 Vergelijk met Delft3D uitkomsten                        | 67   |
| 6.7 Conclusie                                               | 67   |
| 7 VALIDATIE CASE 1: MORFOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN 1965-2002  | 69   |
| 7.1 Inleiding                                               | 69   |
| 7.2 Invoer                                                  | 70   |
| 7.3 Resultaten FINEL2d berekening                           | 70   |
| 7.4 Kwaliteit van de resultaten                             | 74   |
| 7.5 Conclusie                                               | 77   |

|      |                                                         |    |
|------|---------------------------------------------------------|----|
| 8    | VALIDATIE CASE 2: HINDCAST ONTWIKKELINGEN 1860-1970     | 78 |
| 8.1  | Inleiding                                               | 78 |
| 8.2  | Resultaten                                              | 81 |
| 9    | VALIDATIE CASE 3: PLAATRANSTORTING WALSOORDEN 2010-2011 | 86 |
| 9.1  | Inleiding                                               | 86 |
| 9.2  | Resultaten FINEL2d berekening                           | 88 |
| 9.3  | Conclusies                                              | 91 |
| 10   | CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN                             | 92 |
| 10.1 | Conclusies                                              | 92 |
| 10.2 | Aanbevelingen                                           | 93 |
| 11   | REFERENTIES                                             | 94 |

## INLEIDING

In het kader van het LTV V&T project is het de bedoeling om langjarige morfologische berekeningen uit te voeren met het FINEL2d model voor de Westerschelde. Dit model is al gecalibreerd en gevalideerd (Dam, 2006), maar een actualisatie van het model is noodzakelijk om het model geschikt te maken voor langjarige berekeningen (50 jaar).

De actualisatie bestaat uit:

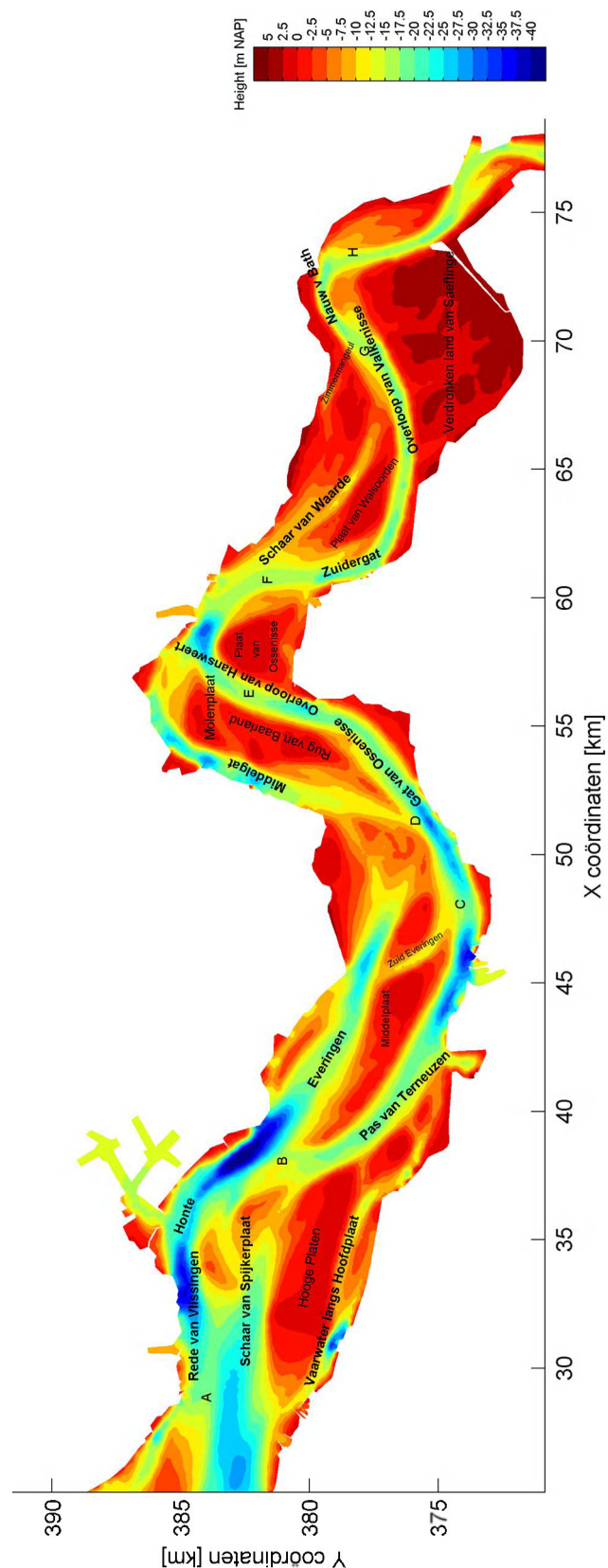
- Optimalisatie rooster en rekentijden
- Optimalisatie waterbeweging (waterstanden en stroomsnelheden)
- Optimalisatie morfologie voor de periode 1998-2002
- Testcase 1 voor de morfologische validatie: langjarige berekening 1965 – 2002
- Testcase 2 voor de morfologische validatie: langjarige berekening 1860 - 1970
- Testcase 2 voor de morfologische validatie: Plaatrandstorting Walsoorden voor 1.1 jaar

Het doel van de actualisatie is het klaarzetten van het model en controleren of met de huidige versie van het FINEL model voldoende nauwkeurige uitkomsten gekregen worden. Daarnaast wordt getracht door een aantal iteratieslagen om de reproductienauwkeurigheid verder te verbeteren. Het gebied van interesse is hierbij gedefinieerd als de monding van de Westerschelde, de Westerschelde en de Zeeschelde (ruwweg tot Antwerpen). In deze gebieden zullen bodemveranderingen uitgerekend worden, daarbuiten niet. Het model is dus in eerste instantie bedoeld voor maatregelen in de Westerschelde (evt. monding) en een deel van de Zeeschelde. Dus niet voor de Schelde en haar zijrivieren (Nete, Dijle, Zenne en Rupel), hoewel deze wel in het model meegenomen worden voor een juiste komberging.

Voor een uitgebreide beschrijving van de onderliggende formuleringen van het FINEL model wordt verwezen naar Bijlage A.

Dit rapport is als volgt opgebouwd: In hoofdstuk 2 wordt de optimalisatie van het rooster en de rekentijden beschreven. Hoofdstuk 3 behandelt de optimalisatie van de waterstanden. Hoofdstuk 4 beschrijft de controle van de waterbeweging op een aantal stroomsnelheidsmetingen. Hoofdstuk 5 gaat specifiek in op de waterbeweging in de Put van Borssele. In hoofdstuk 6 wordt de optimalisatie van de morfologie beschreven voor de periode 1998-2002. Hoofdstuk 7 toont de uitkomsten van de eerste morfologische validatiecase: de ontwikkelingen van een langjarige berekening 1965-2002. Hoofdstuk 8 beschrijft de uitkomsten van de morfologische hindcast van de periode 1860-1970 (110 jaar). In hoofdstuk 9 wordt de tweede morfologische testcase beschreven: de ontwikkelingen van de plaatrandstorting bij Walsoorden. Tenslotte worden in hoofdstuk 10 de conclusies en aanbevelingen gegeven.

Figuur 1.1 toont de belangrijkste namen van de geulen en platen zoals deze gebruikt worden in deze rapportage alsmede de belangrijkste baggergebieden in de Westerschelde.



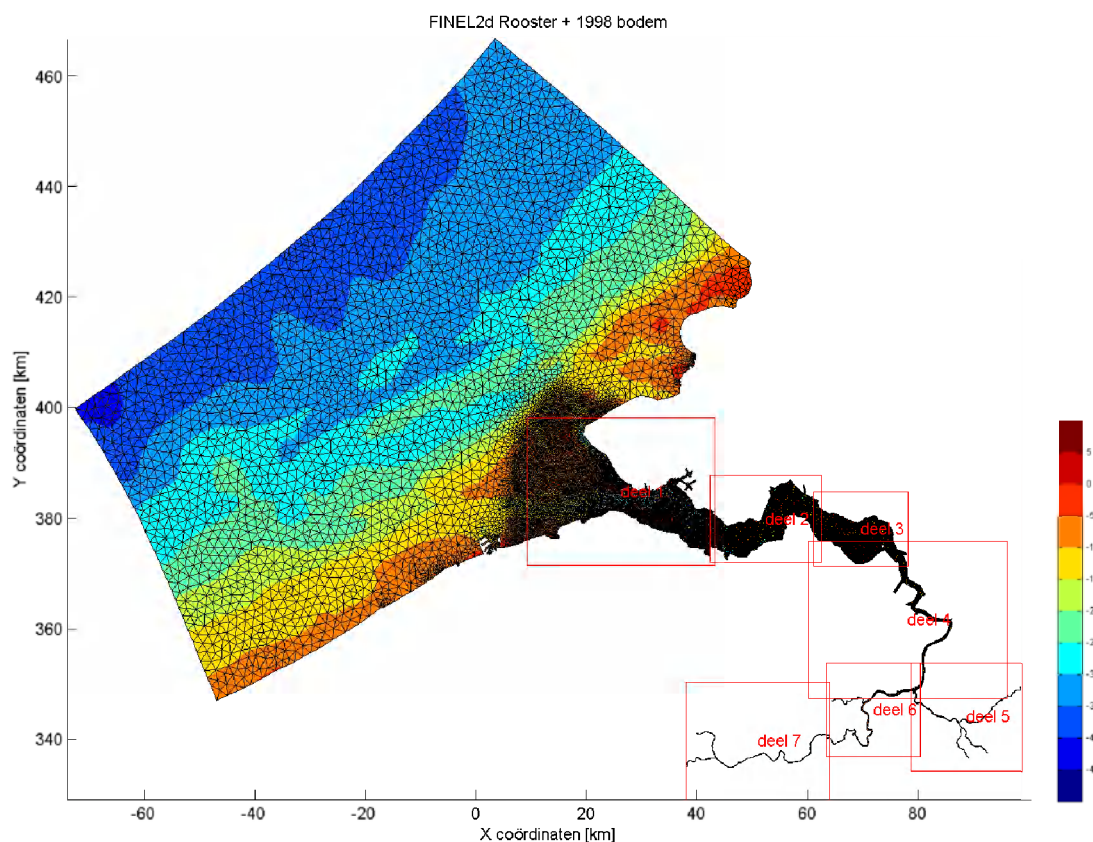
Figuur 1.1: Overzicht naamgeving geulen en platen in de Westerschelde; A-H: belangrijkste baggergebieden; A=Rede van Vlissingen; B=Drempel van Borssele; C=Pas van Terneuzen; D=Drempel van Baarland; E=Overloop van Hansweer; F=Drempel van Hansweer; G=Drempel van Valkenisse; H=Drempel van Bath.

## 2

### ROOSTER OPTIMALISATIE EN REKENTIJDEN

De rekentijden van het FINEL model hangen voor een groot deel af van het aantal elementen van het rooster en de hydraulische tijdstap van het model. Omdat het model voor lange termijn simulaties gebruikt gaat worden is een optimalisatie van het rooster noodzakelijk om de rekentijden binnen de perken te houden. De tijdstap wordt door het model zelf gekozen en hangt af van het Courant getal. Het oude rooster bevatte een aantal cellen die de tijdstap sterk beïnvloedden, daarom is besloten om een nieuw rooster te genereren (met dezelfde randen) en daarbij de tijdstap te optimaliseren. Het resultaat is te zien in figuur 2.1 (met detail opnames in de figuren 2.2 t/m 2.8). De Vlaamse rivieren de Dijle en de Zenne zijn erin geschematiseerd tot de eerste stuw (ongeveer Mechelen) en ook de rivier de Nete is geschematiseerd tot en met Lier, om de komberging in de Zeeschelde te verbeteren. Deze kleine rivieren zijn grotendeels geschematiseerd met 1 gridcel over de breedte van de rivier om te zorgen dat deze gebieden de tijdstap van het model niet gaan bepalen. Aangezien het toepassingsgebied van het model ligt tussen de (monding van de) Westerschelde en Antwerpen is deze aanname gerechtvaardigd (mits de waterbeweging bij Antwerpen niet bepaald wordt door een verkeerde reproductie van de kleine Vlaamse rivieren).

Bij de optimalisatie slag van de bouw van het rooster is gekeken welke roostercellen de tijdstap gaan bepalen. Deze gridcellen zijn vervolgens aangepast totdat een optimaal resultaat verkregen is.



Figuur 2.1: FINEL2d rooster en 1998 bodem (in meters NAP)

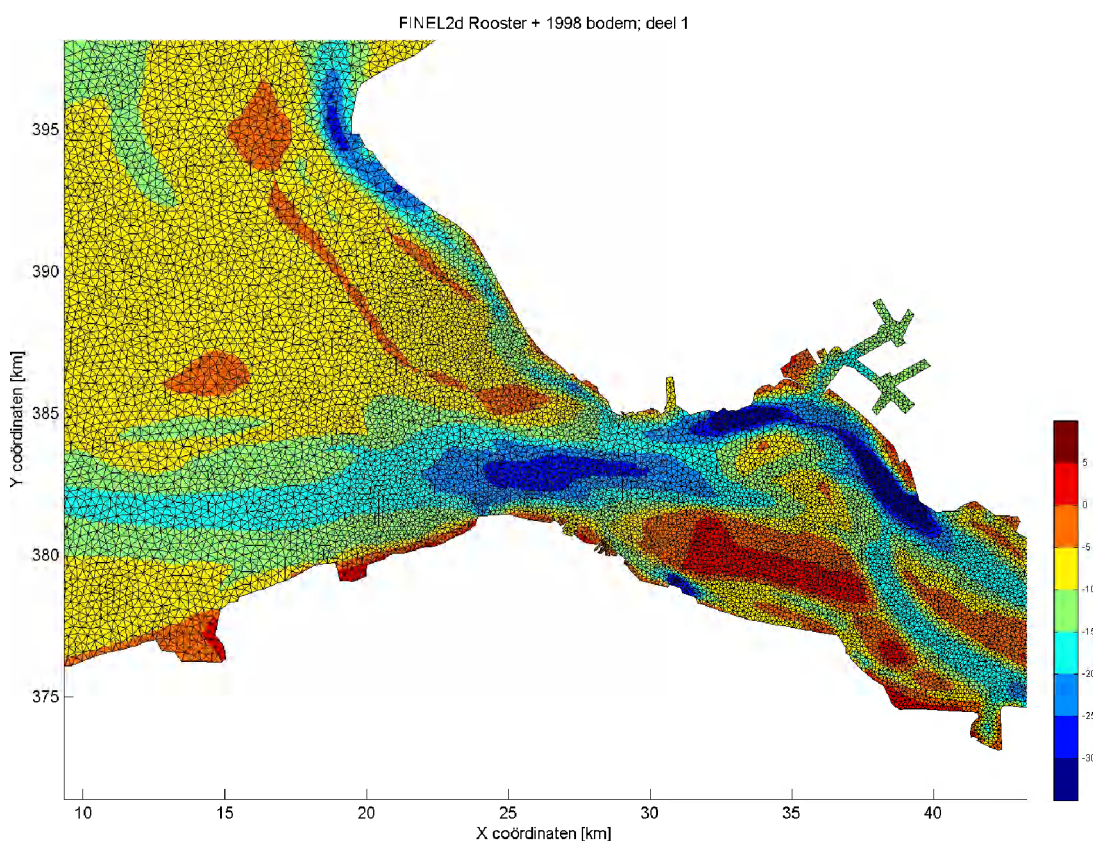
Details van het rooster en de reketijden van het model zijn:

Aantal elementen: 52840 gridcellen  
 Typische roosterafstand: 120-130m in de Westerschelde  
 Tijdstap waterbeweging: 1,41 seconden

Sinds de laatste studie (Dam, 2006) is het model geparallelliseerd en kan dus een stuk sneller rekenen. In tabel 2.1 zijn de reketijden van het model weergegeven voor een parallelle berekening op 12 processoren.

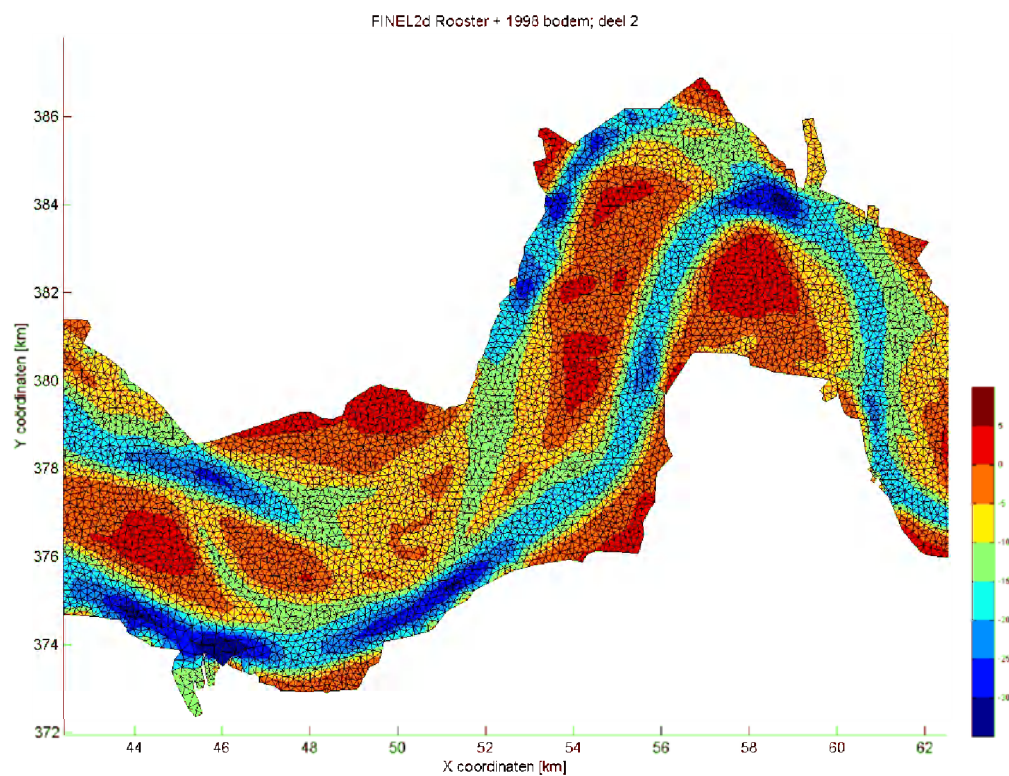
Tabel 2.1: Reketijden van het FINEL model

| Reketijden FINEL2d op Intel Xeon, 12 core 5670 (2.934 GHz) | Natuur versus computer               | Betekenis                                                                                        |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Waterbeweging                                              | 1: 763                               | Bijvoorbeeld 1 jaar waterbeweging heeft 11,5 uur simulatietijd.                                  |
| Morfologie                                                 | 1: 120<br>(waterbewegingstijdschaal) | 1 jaar morfologie heeft +/- 3 uur simulatietijd (met morfologische versnellingsfactor van 24.75) |

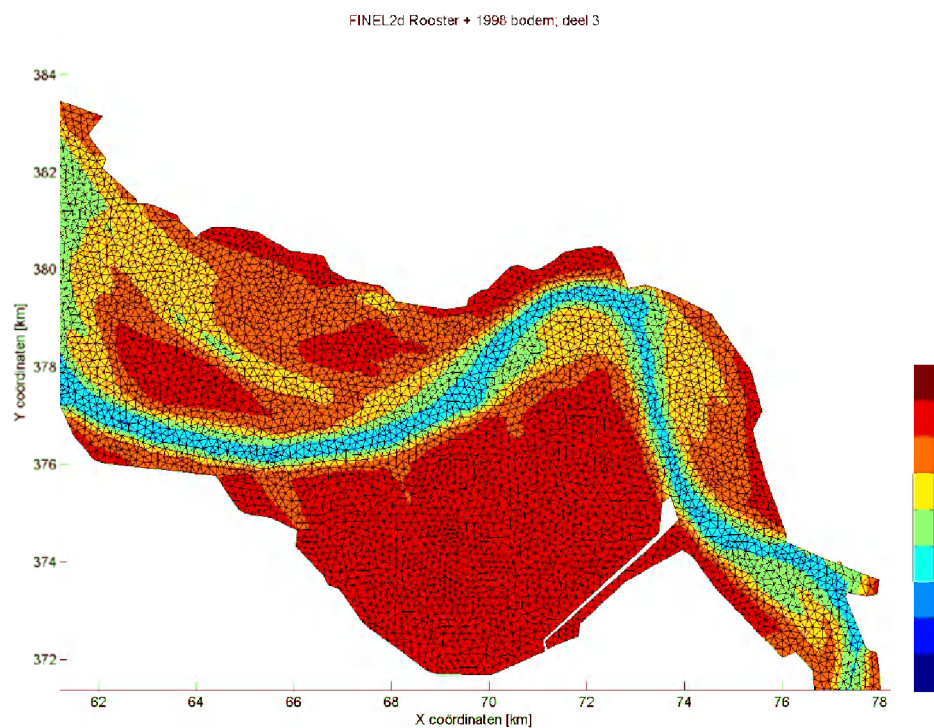


Figuur 2.2: detail FINEL2d rooster

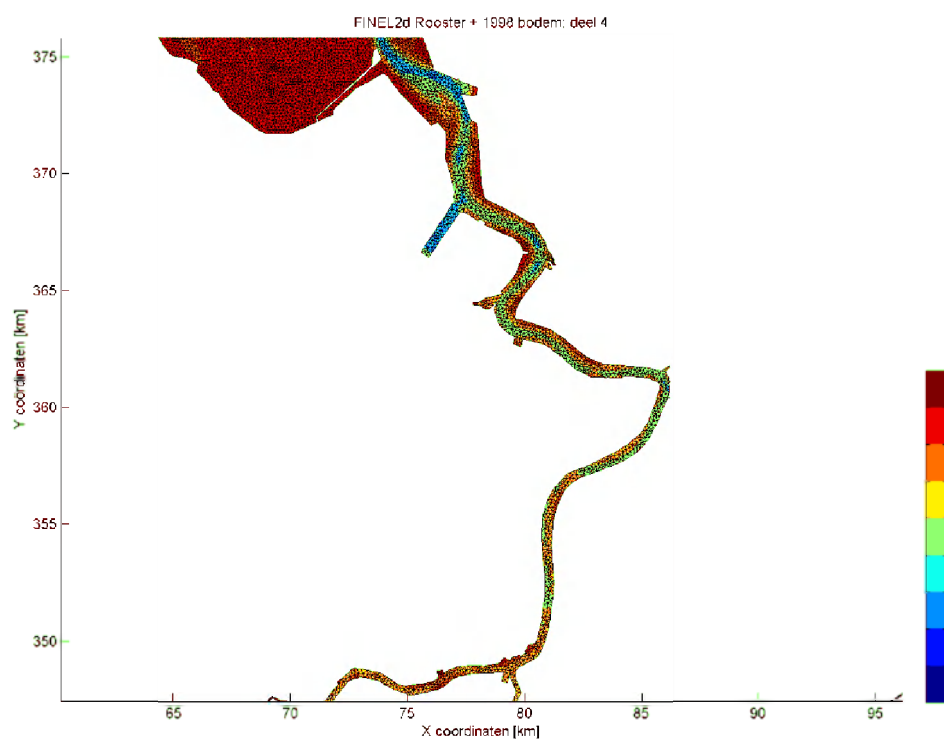




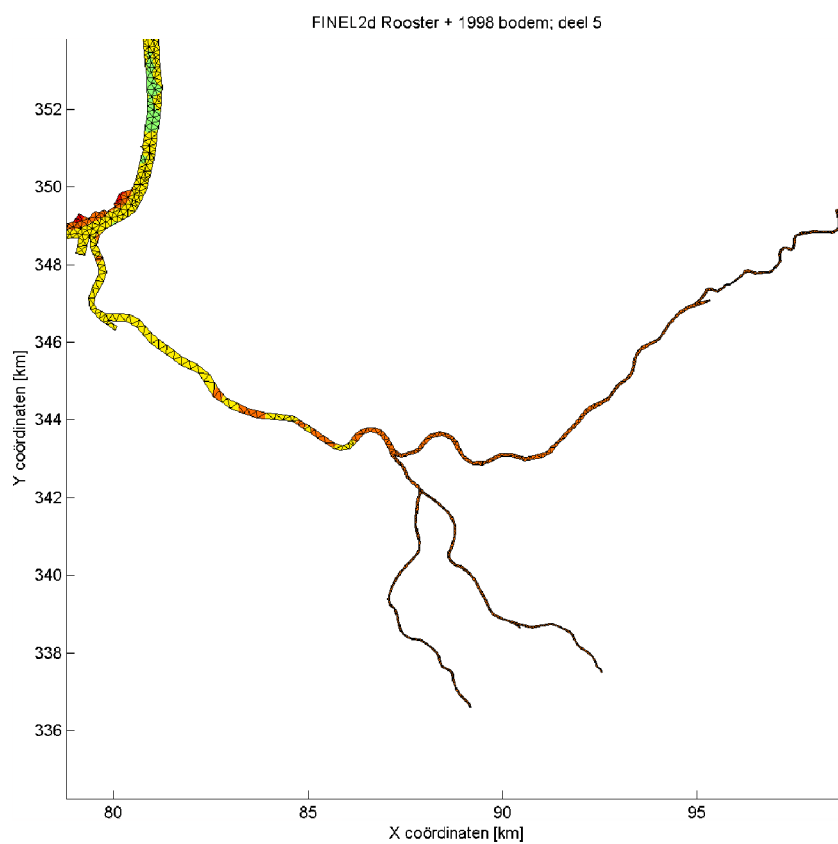
*Figuur 2.3: detail FINEL2d rooster*



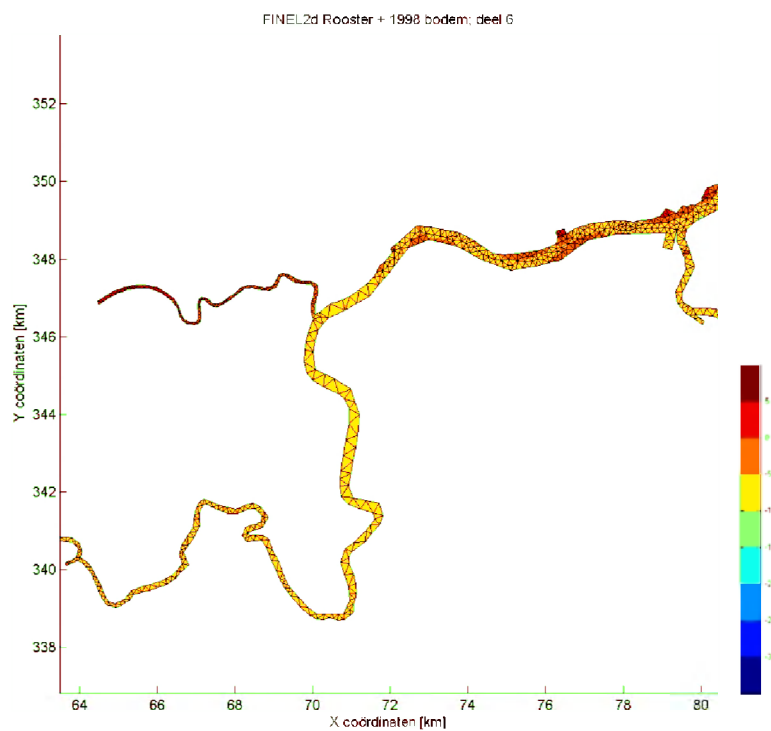
*Figuur 2.4: detail FINEL2d rooster*



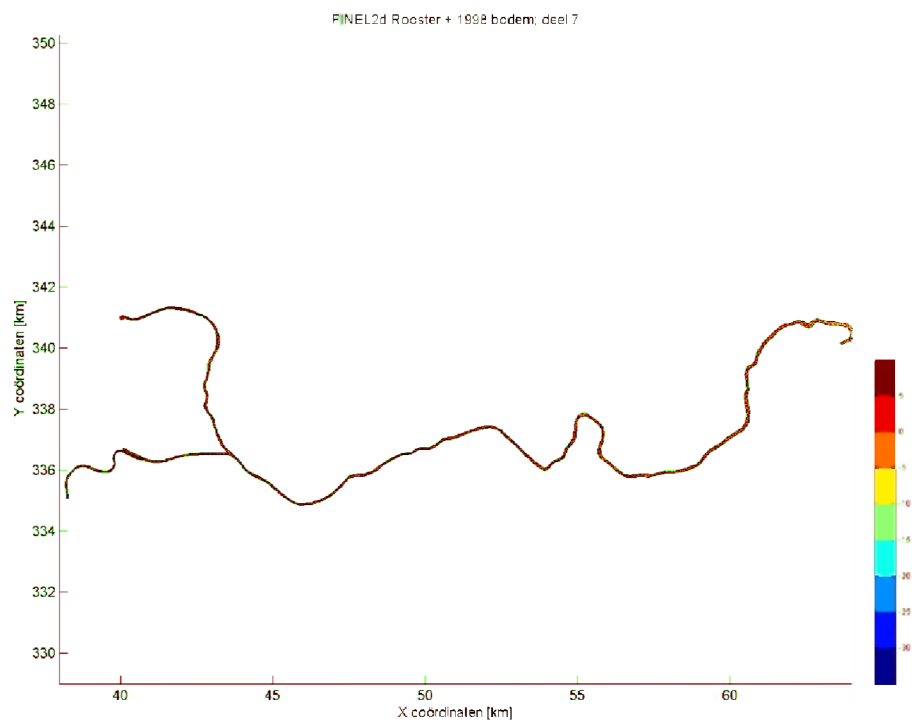
Figuur 2.5: detail FINEL2d rooster



Figuur 2.6: detail FINEL2d rooster



*Figuur 2.7: detail FINEL2d rooster*



*Figuur 2.8: detail FINEL2d rooster*

**3.1 Inleiding**

Voor de waterbeweging is een optimalisatie uitgevoerd voor de waterstanden en voor een aantal punten een controle op de stroomsnelheden; dit laatste wordt behandeld in het volgende hoofdstuk.

**3.2 Waterstanden**

Gekeken is naar de waterstanden van het jaar 2006. Dit is dezelfde periode als bij de calibratie van het NEVLA model (Maximova et al., 2009a, b, c) en biedt de mogelijkheid een goede vergelijking tussen beide modellen en met de metingen te maken. De gemeten waterstanden van 2006, alsmede de NEVLA resultaten zijn aangeleverd door WL Borgerhout.

Het FINEL2d model wordt aangedreven door astronomische randvoorwaarden op de zeerland waarmee elke willekeurige periode gesimuleerd kan worden. Deze randvoorwaarden zijn hetzelfde als in de eerdere studie (Dam, 2006). Het gehele jaar 2006 is gesimuleerd met het FINEL model voor deze vergelijking. De debieten van de bovenrivieren in Vlaanderen zijn constant gehouden op gemiddelde afvoeren. De bodem van 2006 is gebruikt als input (niet getoond).

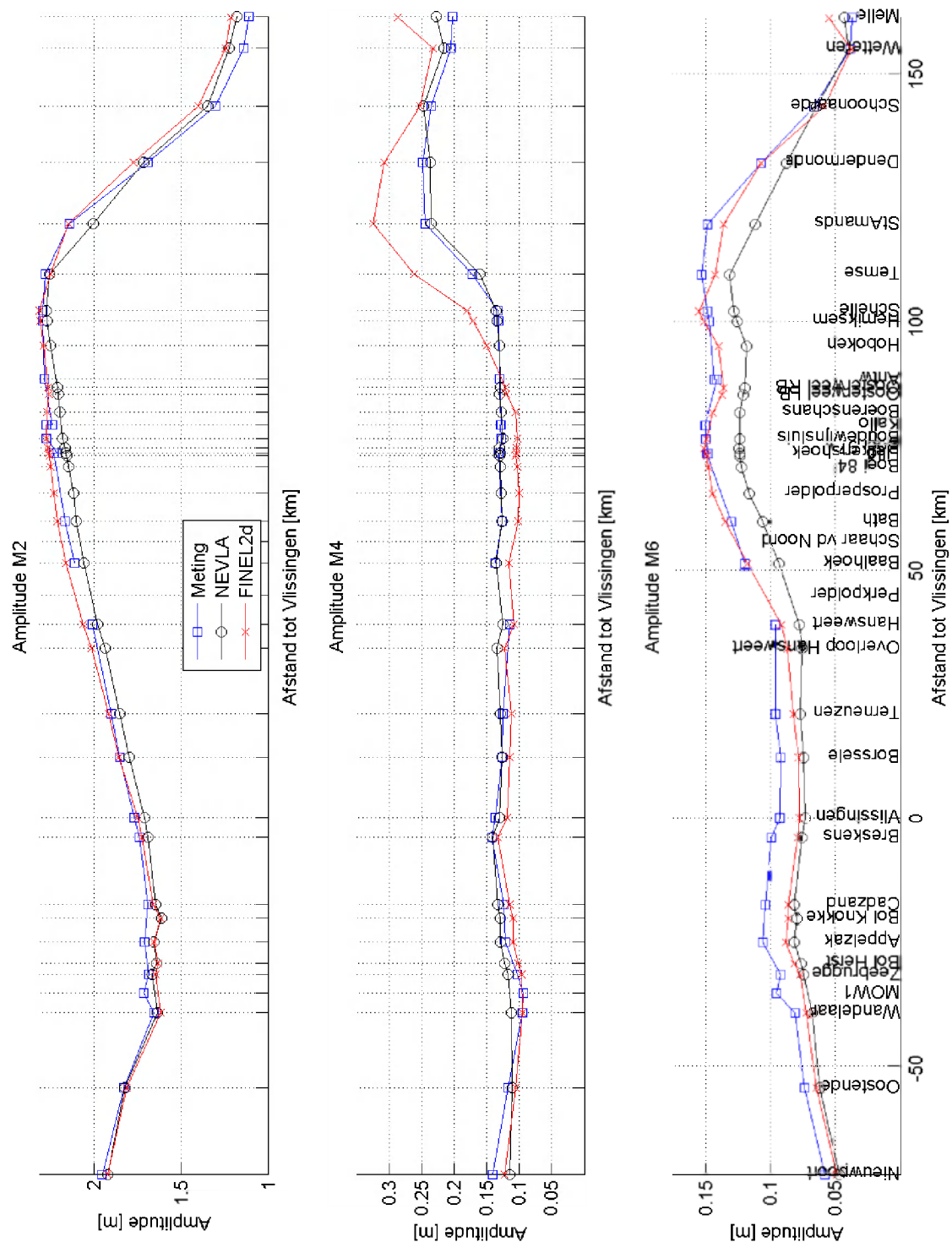
Er zijn diverse berekeningen uitgevoerd met verschillende bodemruwheden om het beste resultaat te krijgen. Uiteindelijk voldoet een nikuradse ruwheid van 1 cm in het gehele modeldomein het beste. Het resultaat is te zien in figuur 3.1 en 3.2 waar de amplitude en fase van de M2, M4 en M6 componenten getoond zijn langs de as van de (Wester)schelde. Het matlab programma `t_tide` is gebruikt om de componenten te bepalen van de meting en beide modellen, zodat geen verschillen aanwezig zijn in de gebruikte methode voor het bepalen van amplitudes en fases. Het oorspronkelijke FINELd model van de Schelde (Dam, 2006) heeft een ruimtelijk variërende ruwheid. Het valt niet uit te sluiten dat (kleine) verdere verbeteringen te behalen zijn met dit model door de ruwheid verder ruimtelijk te variëren, maar omdat dit model ingezet gaat worden op lange-termijn morfologische voorspellingen, is ervoor gekozen om dit specifiek niet te doen. Een dergelijke ruimtelijk variërende ruwheid zorgt voor discontinuïteiten in het sedimenttransport en het is maar zeer de vraag of een gevonden variërende ruwheid een fysische oorzaak heeft. Bovendien is het zeer onwaarschijnlijk dat een variërende ruwheid over een lange tijd (meerdere jaren) geldig is.

Te zien is dat FINEL2d de M2 componenten goed kan berekenen, ook in de Zeeschelde met slechts 1 gridcel over de breedte van de rivier. In de Westerschelde is de reproductienaauwkeurigheid van FINEL2d voor de M2 component iets beter dan NEVLA. NEVLA onderschat de M2 component consequent in de Westerschelde. In de Boven-Zeeschelde is NEVLA iets beter. Voor de M4 component is FINEL2d iets te laag in de Westerschelde en iets te hoog in de Zeeschelde (let op de kleine amplitudes van de M4 component). NEVLA kan de M4 component iets beter berekenen, terwijl de M6 component door FINEL2d beter berekend wordt dan door NEVLA.

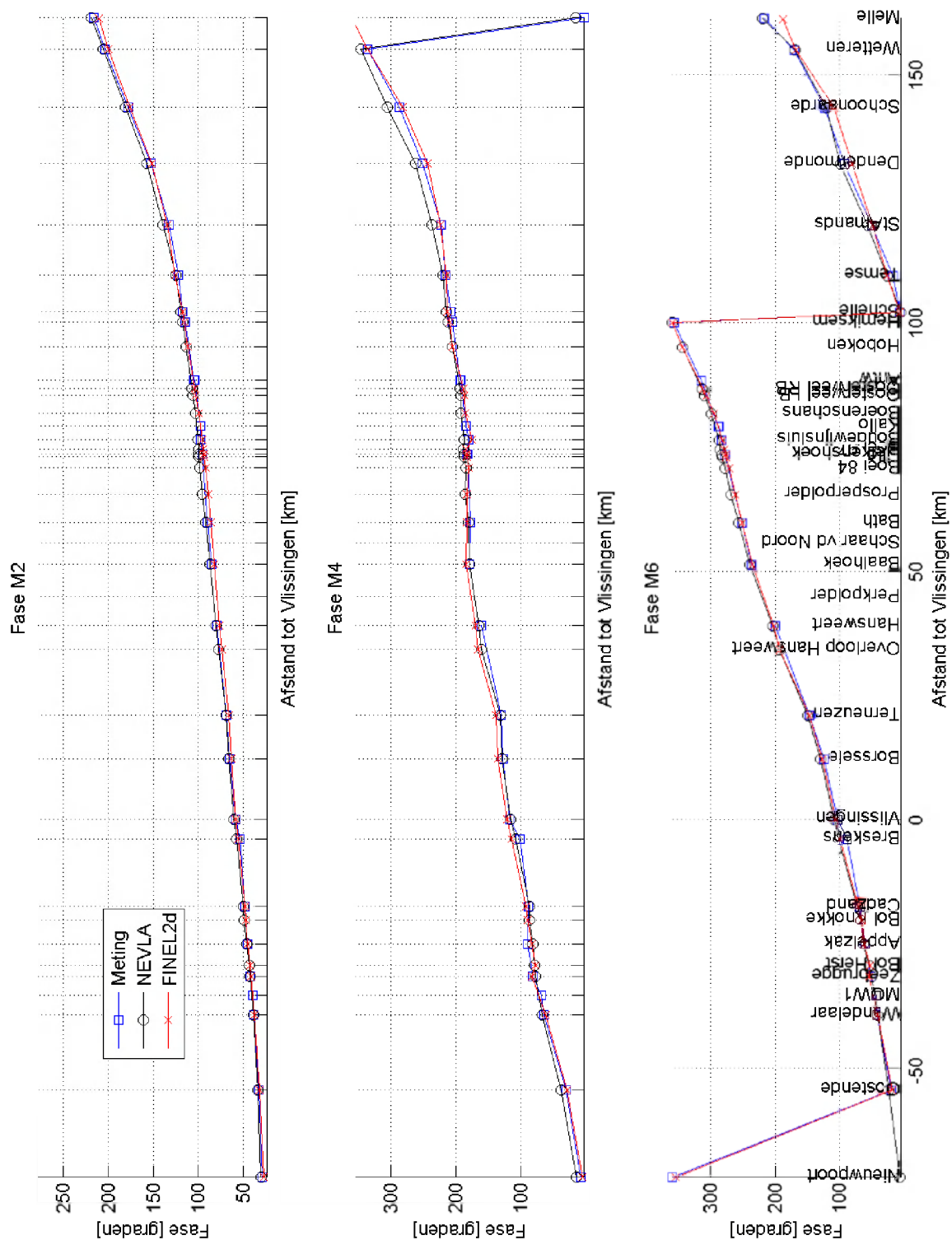
Figuur 3.2 laat de fasen zien van de drie componenten. Te zien is dat de modellen vrijwel op de meting liggen.

In Tabel 3.1 zijn de werkelijke amplitudes van de M2, M4 en M6 componenten uitgezet per station. De procentuele afwijkingen van het NEVLA en het FINEL model ten opzichte van de metingen staan in de overige kolommen. Hieruit blijkt dat de M2 amplitude afwijking voor FINEL

voor het grootste deel van de Noordzee, Westerschelde en Zeeschelde maximaal 3% bedraagt. Pas bovenstrooms in de Schelde rivier gaat de amplitude substantieel afwijken van de meting. Voor de M4 component is de procentuele afwijking groter, maar de amplitudes zijn ook kleiner. De afwijkingen voor de Noordzee, Westerschelde en Zeeschelde tot en met Antwerpen zijn acceptabel. Bovenstrooms van Antwerpen gaat de M4 component sterk afwijken door de beperkte schematisatie. De M6 component afwijking bedraagt maximaal 21% voor het gebied van interesse, en is alleszins acceptabel voor de FINEL uitkomsten.



Figuur 3.1: Amplitudes van M2, M4, M6 voor meting, NEVLA en FINEL2d in 2006.



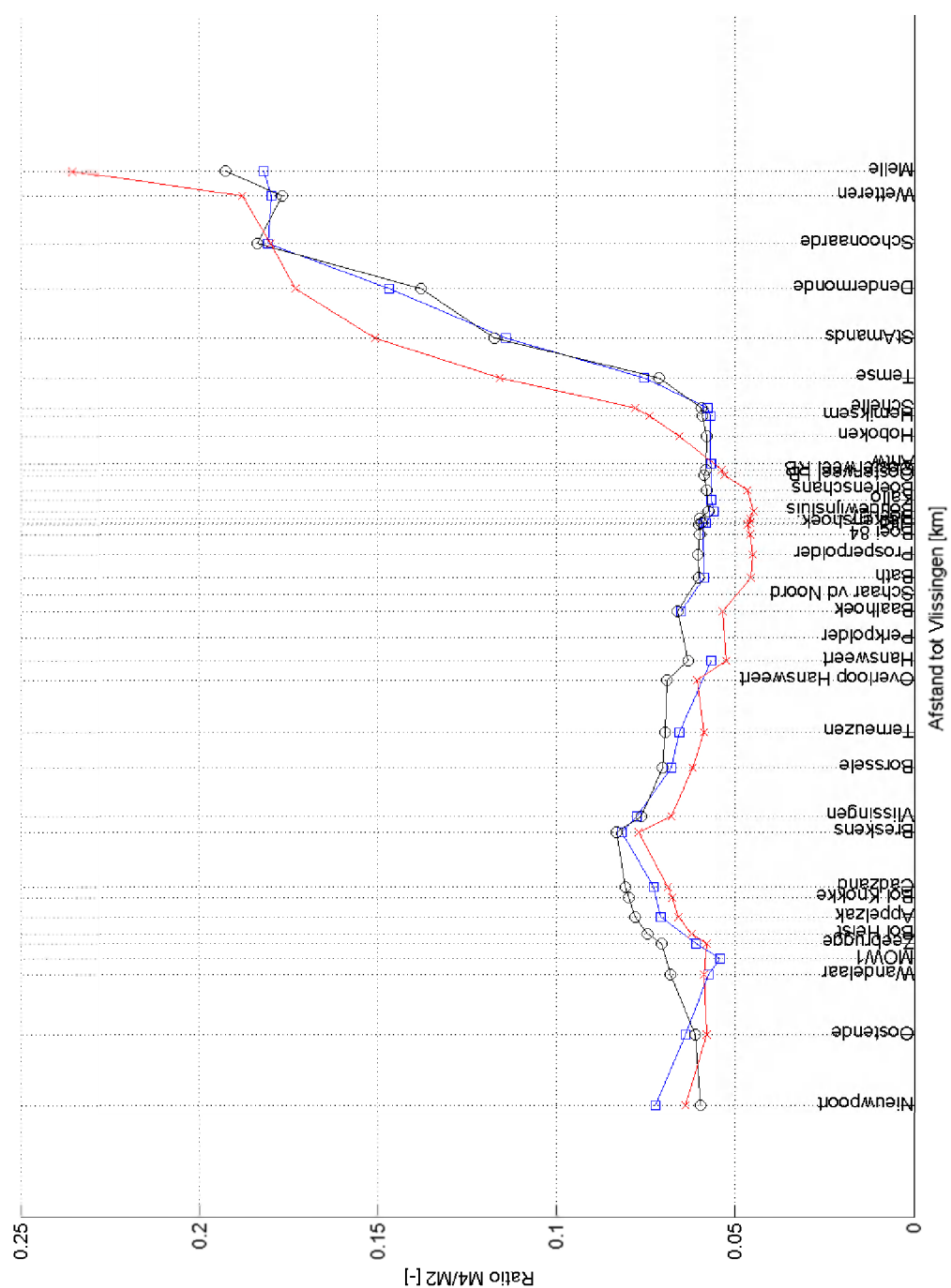
Figuur 3.2: Fases van M2, M4, M6 voor meting, NEVLA en FINEL2d in 2006.

Tabel 3.1: Amplitudes M2, M4 en M6 voor meting, NEVLA en FINEL2d in 2006

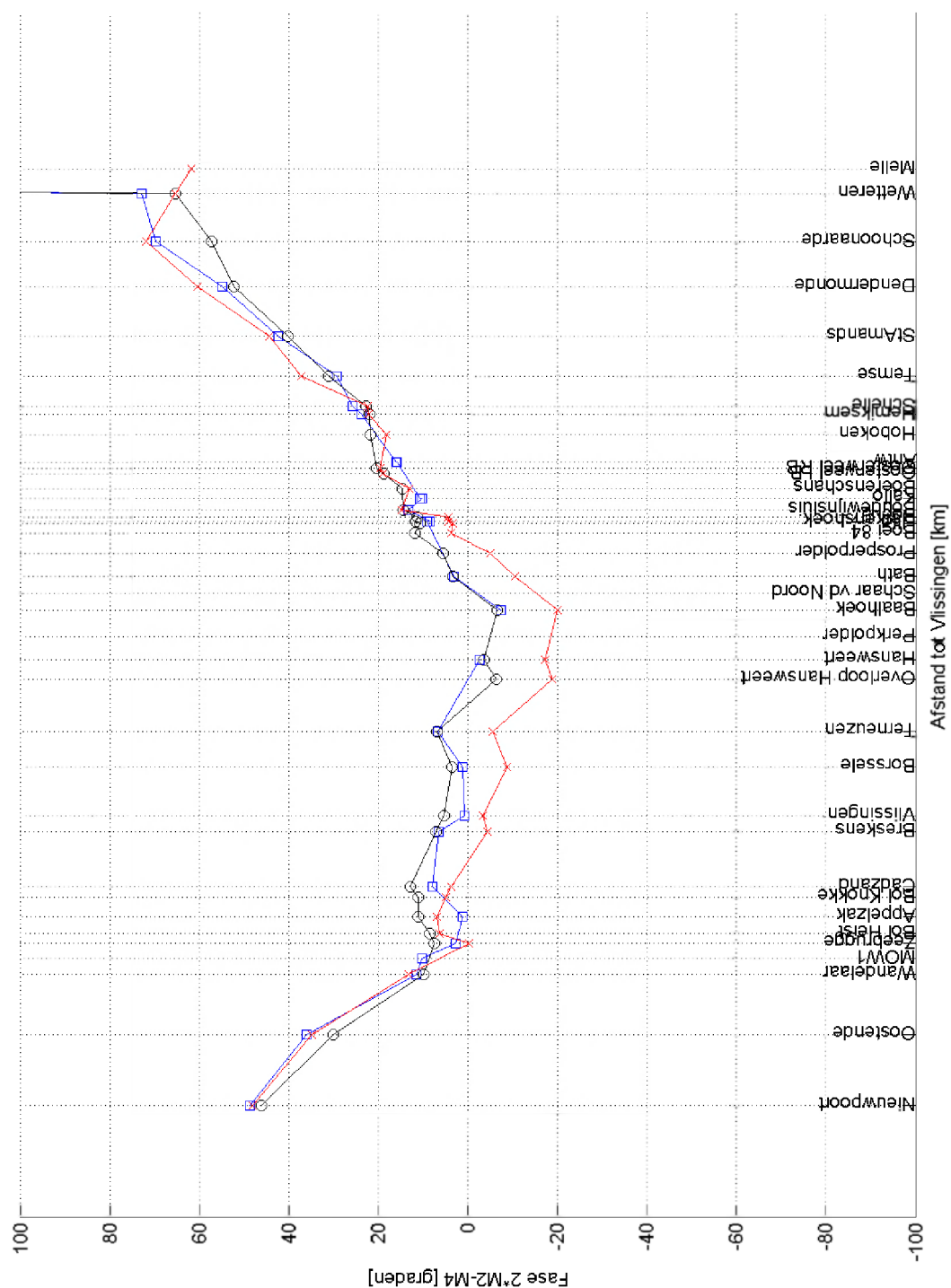
| Station        | VERSCHIL        |              |              | VERSCHIL        |              |              | VERSCHIL        |              |              |
|----------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|
|                | Amplitude<br>M2 |              |              | Amplitude<br>M4 |              |              | Amplitude<br>M6 |              |              |
|                | METING<br>(m)   | NEVLA<br>(%) | FINEL<br>(%) | METING<br>(m)   | NEVLA<br>(%) | FINEL<br>(%) | METING<br>(m)   | NEVLA<br>(%) | FINEL<br>(%) |
| Nieuwpoort     | <b>1.96</b>     | -2%          | -2%          | <b>0.14</b>     | -19%         | -13%         | <b>0.06</b>     | -19%         | -16%         |
| Oostende       | <b>1.83</b>     | 0%           | -1%          | <b>0.12</b>     | -5%          | -10%         | <b>0.07</b>     | -16%         | -12%         |
| Wandelaar      | <b>1.66</b>     | -1%          | -2%          | <b>0.10</b>     | 17%          | 0%           | <b>0.08</b>     | -17%         | -11%         |
| MOW1           | <b>1.72</b>     | -3%          | -3%          | <b>0.09</b>     | 26%          | 6%           | <b>0.10</b>     | -23%         | -17%         |
| Zeebrugge      | <b>1.68</b>     | -1%          | -2%          | <b>0.10</b>     | 15%          | -7%          | <b>0.09</b>     | -19%         | -16%         |
| Appelzak       | <b>1.71</b>     | -3%          | -3%          | <b>0.12</b>     | 7%           | -10%         | <b>0.11</b>     | -23%         | -17%         |
| Cadzand        | <b>1.69</b>     | -3%          | -2%          | <b>0.12</b>     | 8%           | -7%          | <b>0.10</b>     | -21%         | -17%         |
| Breskens       | <b>1.74</b>     | -3%          | -1%          | <b>0.14</b>     | -1%          | -7%          | <b>0.10</b>     | -24%         | -21%         |
| Vlissingen     | <b>1.77</b>     | -3%          | -1%          | <b>0.14</b>     | -5%          | -13%         | <b>0.09</b>     | -21%         | -16%         |
| Borssele       | <b>1.86</b>     | -3%          | 0%           | <b>0.13</b>     | 0%           | -9%          | <b>0.09</b>     | -20%         | -15%         |
| Terneuzen      | <b>1.90</b>     | -3%          | 1%           | <b>0.13</b>     | 3%           | -10%         | <b>0.10</b>     | -20%         | -14%         |
| Hansweert      | <b>2.01</b>     | -2%          | 3%           | <b>0.11</b>     | 10%          | -5%          | <b>0.10</b>     | -19%         | -5%          |
| Baalhoek       | <b>2.11</b>     | -3%          | 2%           | <b>0.14</b>     | -1%          | -16%         | <b>0.12</b>     | -22%         | -2%          |
| Bath           | <b>2.17</b>     | -3%          | 2%           | <b>0.13</b>     | 0%           | -20%         | <b>0.13</b>     | -19%         | 3%           |
| Liefkenshoek   | <b>2.23</b>     | -3%          | 1%           | <b>0.13</b>     | -2%          | -21%         | <b>0.15</b>     | -17%         | 1%           |
| Boudewijnsdijk | <b>2.28</b>     | -4%          | 0%           | <b>0.13</b>     | -1%          | -20%         | <b>0.15</b>     | -17%         | -1%          |
| Kallo          | <b>2.28</b>     | -4%          | 0%           | <b>0.13</b>     | -3%          | -21%         | <b>0.15</b>     | -17%         | -3%          |
| Antwerpen      | <b>2.29</b>     | -3%          | -1%          | <b>0.13</b>     | -3%          | -5%          | <b>0.14</b>     | -16%         | -6%          |
| Hemiksem       | <b>2.30</b>     | -1%          | 1%           | <b>0.13</b>     | 2%           | 30%          | <b>0.15</b>     | -15%         | 3%           |
| Schelle        | <b>2.30</b>     | -1%          | 1%           | <b>0.13</b>     | 2%           | 36%          | <b>0.15</b>     | -14%         | 4%           |
| Temse          | <b>2.28</b>     | -1%          | -1%          | <b>0.17</b>     | -7%          | 52%          | <b>0.15</b>     | -14%         | -7%          |
| StAmands       | <b>2.14</b>     | -6%          | 0%           | <b>0.24</b>     | -4%          | 32%          | <b>0.15</b>     | -24%         | -8%          |
| Dendermonde    | <b>1.69</b>     | 1%           | 5%           | <b>0.25</b>     | -5%          | 24%          | <b>0.11</b>     | -18%         | 0%           |
| Schoonaarde    | <b>1.30</b>     | 4%           | 8%           | <b>0.23</b>     | 5%           | 7%           | <b>0.07</b>     | -3%          | -12%         |
| Wetteren       | <b>1.14</b>     | 7%           | 9%           | <b>0.20</b>     | 6%           | 14%          | <b>0.04</b>     | 4%           | -3%          |
| Melle          | <b>1.11</b>     | 6%           | 9%           | <b>0.20</b>     | 13%          | 42%          | <b>0.04</b>     | 15%          | 47%          |

In de figuren 3.3 en 3.4 is de ratio M4/M2 amplitude en de fase 2xM2-M4 getoond voor de meting, NEVLA en FINEL2d in 2006. Deze figuren zijn een maat voor de getijasymmetrie (Friedrichs and Aubrey, 1988). Te zien is hoe de vorm van de curve door de modellen goed gevolgd kan worden. Bij FINEL2d is de verhouding M4/M2 en fase 2xM2-M4 in het middendeel van het Schelde estuarium iets te laag.





Figuur 3.3: Ratio M4/M2 voor meting, NEVLA en FINEL2d in 2006.



Figuur 3.4: Fase2 x M2 - M4 voor meting, NEVLA en FINEL2d in 2006

### 3.3 Conclusie

Geconcludeerd kan worden dat de reproductienauwkeurigheid van het FINEL2d model goede overeenkomsten vertoont met de metingen van waterstanden. De reproductienauwkeurigheid van de waterstanden ligt in dezelfde orde grootte als het NEVLA model. Geconcludeerd kan

worden dat de waterstanden voldoende nauwkeurig afgeregeld zijn. De grove resolutie van de Vlaamse rivieren heeft een negatief effect op de waterstanden aldaar, maar dit werkt verder niet door in het zeewaarts gelegen interessegebied.

## 4 WATERBEWEGING: VALIDATIE OP STROOMSNELHEDEN

De validatie die in dit hoofdstuk beschreven is betreft een vergelijking van berekende en gemeten stroomsnelheden in de Westerschelde. Doel is te valideren of de uniforme ruwheid van 0,01 m ook voor de stroomsnelheden de meest geschikte instelling is. Zo niet, dan dient een nadere kalibratie uitgevoerd te worden waarbij niet alleen naar (astronomische) waterstanden maar ook naar stroomsnelheden gekeken dient te worden.

In de Westerschelde zijn dankzij diverse meetcampagnes datasets met stroomsnelheden verkregen. In de hiernavolgende paragrafen wordt per projectgebied aangegeven welke metingen gebruikt zijn in de validatie. Vervolgens is een vergelijking tussen de metingen enerzijds en de modelresultaten anderzijds gemaakt. Hierbij is steeds de bodemligging uit dat betreffende jaar gebruikt in het FINEL2d model.

De meetcampagnes op de volgende locaties zijn gebruikt voor de validatie:

- Bath (paragraaf 4.1)
- Plaat van Ossenis (paragraaf 4.2)
- Gat van Ossenis / Middelgat (paragraaf 4.3)
- Put van Borssele (hoofdstuk 5)

Omdat in de Put van Borssele driedimensionale effecten in de stroommetingen zijn geconstateerd, wordt de Put van Borssele ook gevalideerd met behulp van het FINEL3d model. Op de validatie van de Put van Borssele wordt in Hoofdstuk 5 ingegaan.

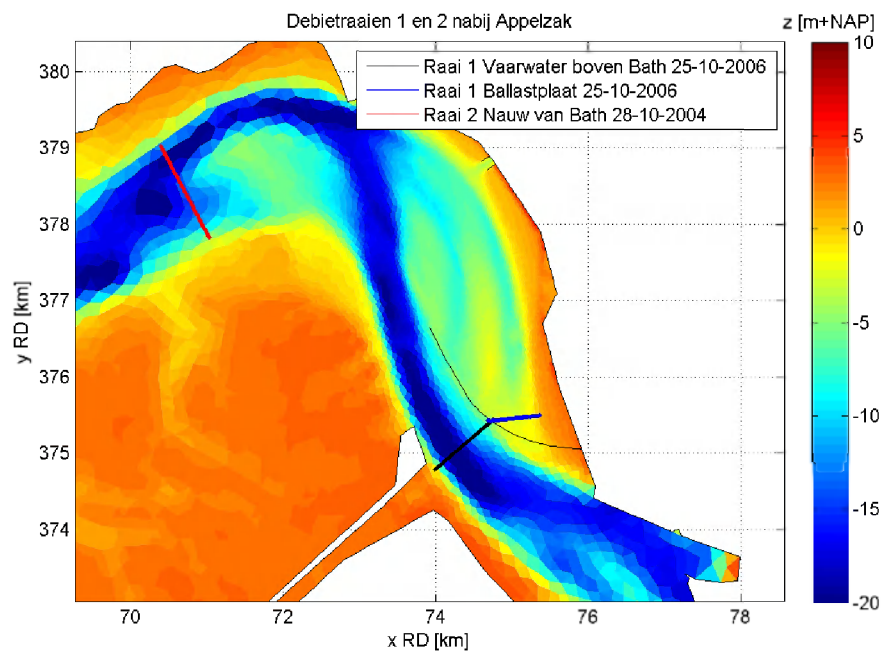
### 4.1 Bath

#### 4.1.1 Beschikbare metingen

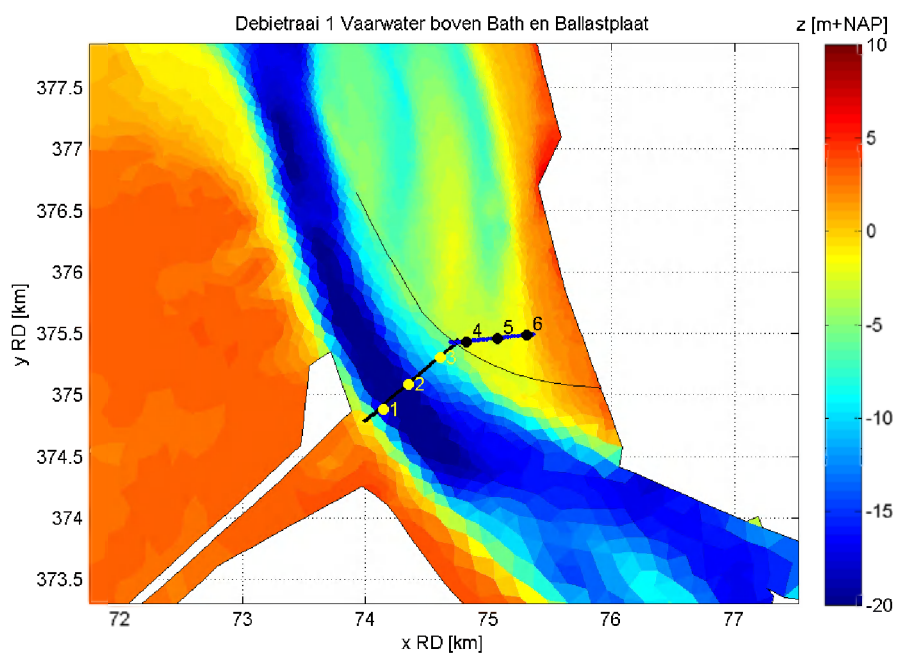
Rond Bath liggen twee raaien waarin in debietmetingen zijn uitgevoerd. De locaties van deze debietraaien zijn weergegeven in Figuur 4.1. Debietraai 1 bestaat uit een gedeelte door het Vaarwater boven Bath en een gedeelte over de Ballastplaat. Voor deze raai zijn debietmetingen uitgevoerd op 26 oktober 2006. Raai 2 ten westen van Bath ligt door het Nauw van Bath en is op 28 oktober 2004 bemeten (Bron gegevens: Rijkswaterstaat Zeeland – Meetadviesdienst).

De debietmetingen zijn uitgevoerd met een ADCP, waardoor langs deze raaien verticale snelheidsprofielen beschikbaar zijn. Ten behoeve van de vergelijking met dieptegemiddelde snelheden resulterend uit het FINEL2d model zijn op basis van de verticale snelheidsprofielen dieptegemiddelde snelheden bepaald.

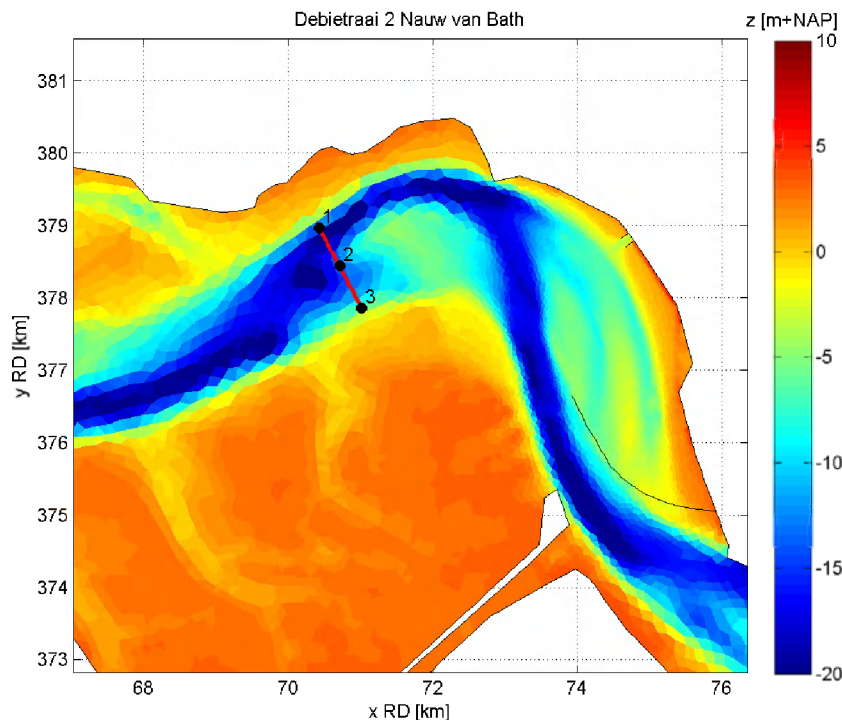
Op elke raai is een drietal punten gedefinieerd die als uitvoerpunten in het FINEL2d model zijn ingevoerd. De punten op de beide delen van debietraai 1 zijn weergegeven in Figuur 4.2 en de punten op debietraai 2 in Figuur 4.3. Omdat na analyse van de metingen en de simulatieresultaten is gebleken dat in locatie 1 van debietraai 1 nauwelijks metingen zijn verricht, wordt locatie 1 op debietraai 1 verder niet in beschouwing genomen.



Figuur 4.1: Debietraaien nabij Bath



Figuur 4.2: Uitvoerpunten op debietraai 1



Figuur 4.3: Uitvoerpunten op debietraai 2

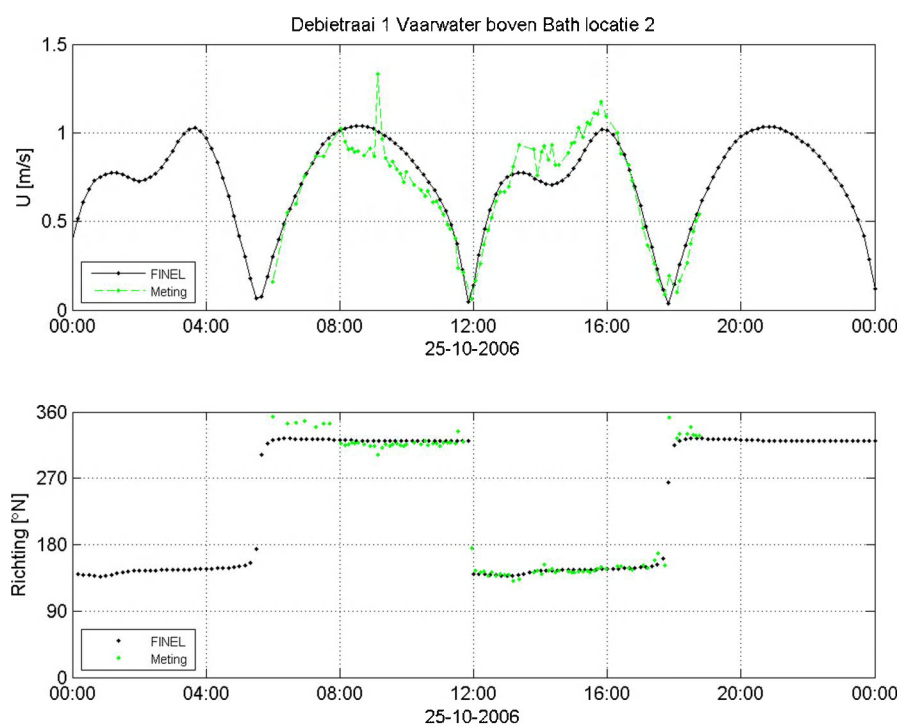
#### 4.1.2 Vergelijking met FINEL2d

In Figuur 4.4 tot en met Figuur 4.8 is de vergelijking tussen de metingen en de FINEL resultaten in locaties 2-5 van debietraai 1 gegeven.

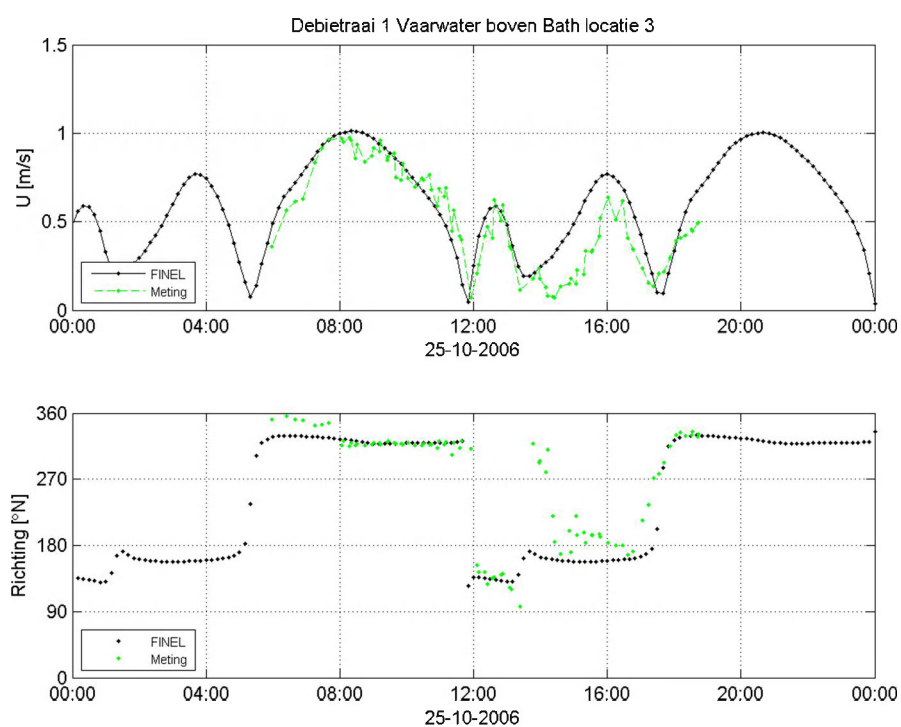
Zeker gezien de ligging van de drie locaties op de Ballastplaat, namelijk direct achter de leidam, zijn de resultaten van het model bijzonder goed te noemen. Ook de modelresultaten in de twee locaties in het Vaarwater boven Bath komen over het algemeen zeer goed overeen met de metingen, zowel qua grootte als qua timing.

In Figuur 4.9 tot en met Figuur 4.11 is de vergelijking tussen de metingen en de modelresultaten voor de drie locaties in debietraai 2 gegeven. De resultaten hier zijn ook goed.

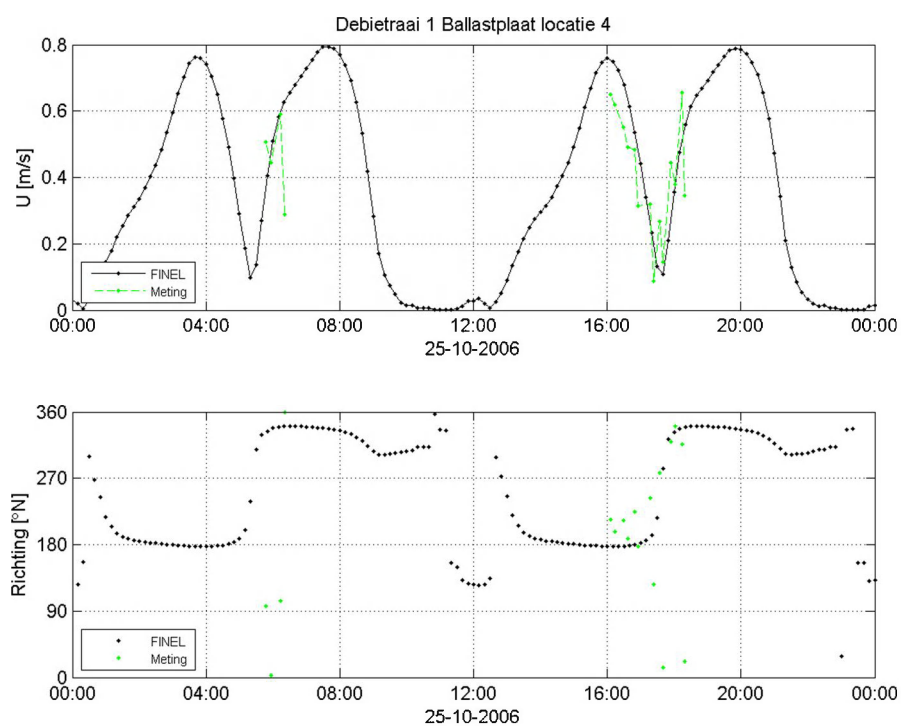
Middels een gevoeligheidsstudie is onderzocht of andere uniforme bodemruwheden of ruimtelijk variërende bodemruwheden resulteren in een (nog) betere vergelijking met de metingen. Geen van de gevoeligheidsberekeningen resulteren echter in een significant betere vergelijking met de metingen.



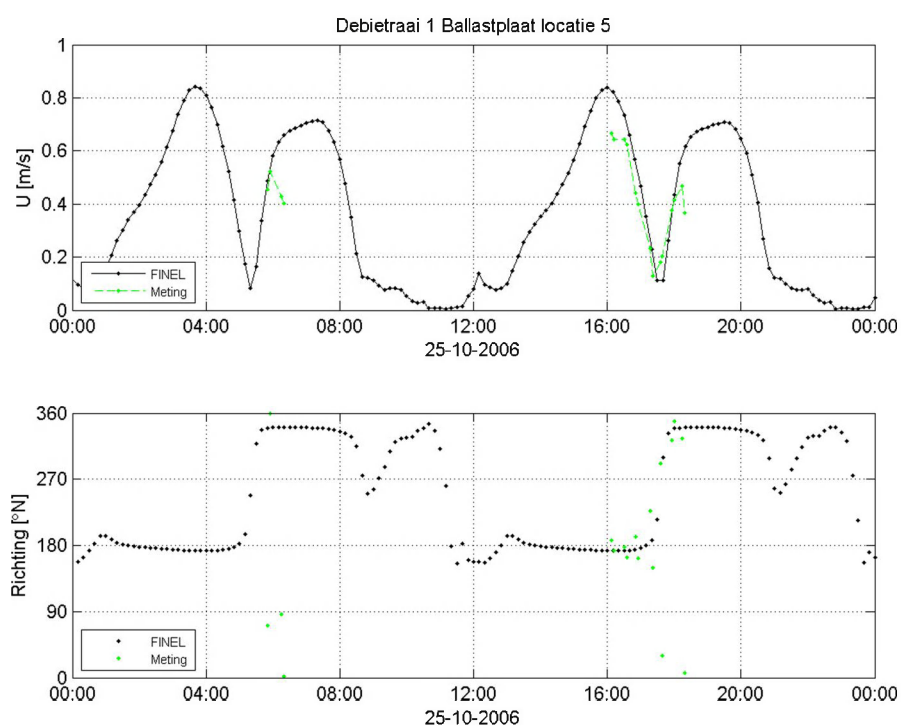
Figuur 4.4: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 2 van debietraai 1



Figuur 4.5: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 3 van debietraai 1

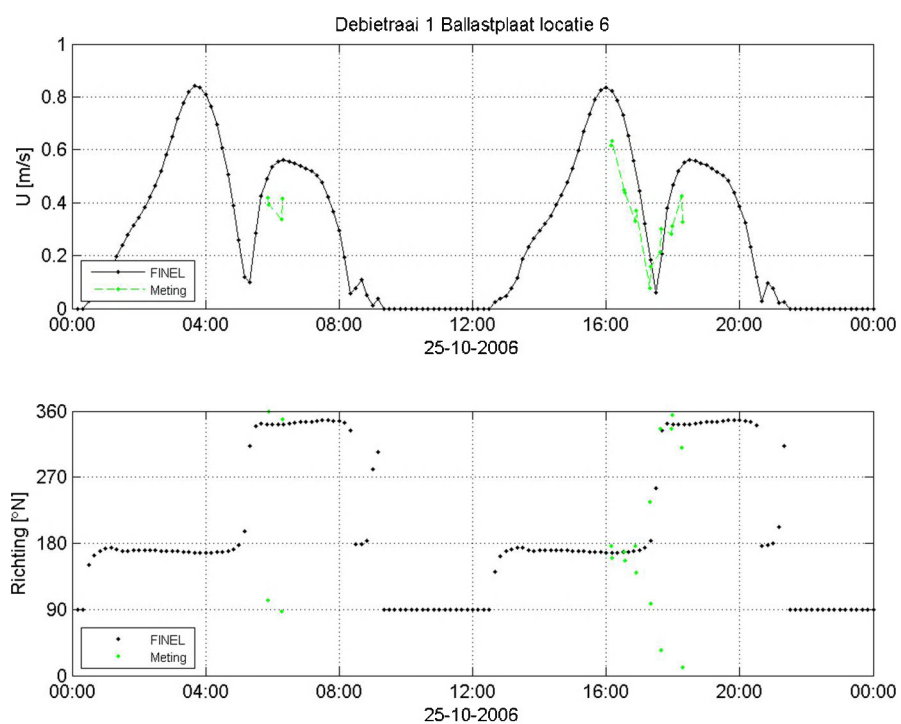


Figuur 4.6: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 4 van debietraai 1

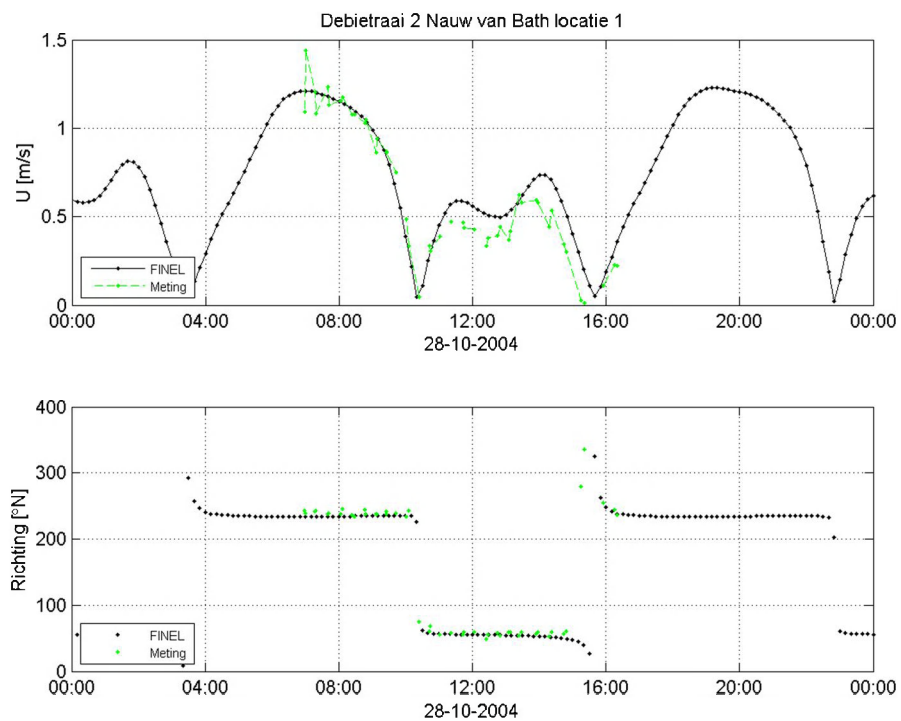


Figuur 4.7: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 5 van debietraai 1

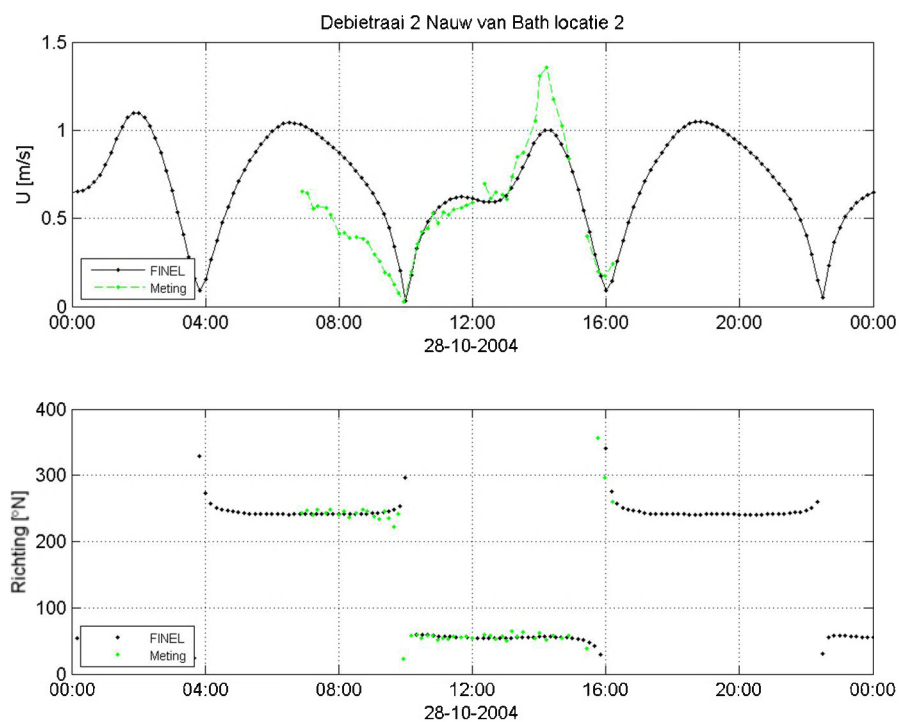




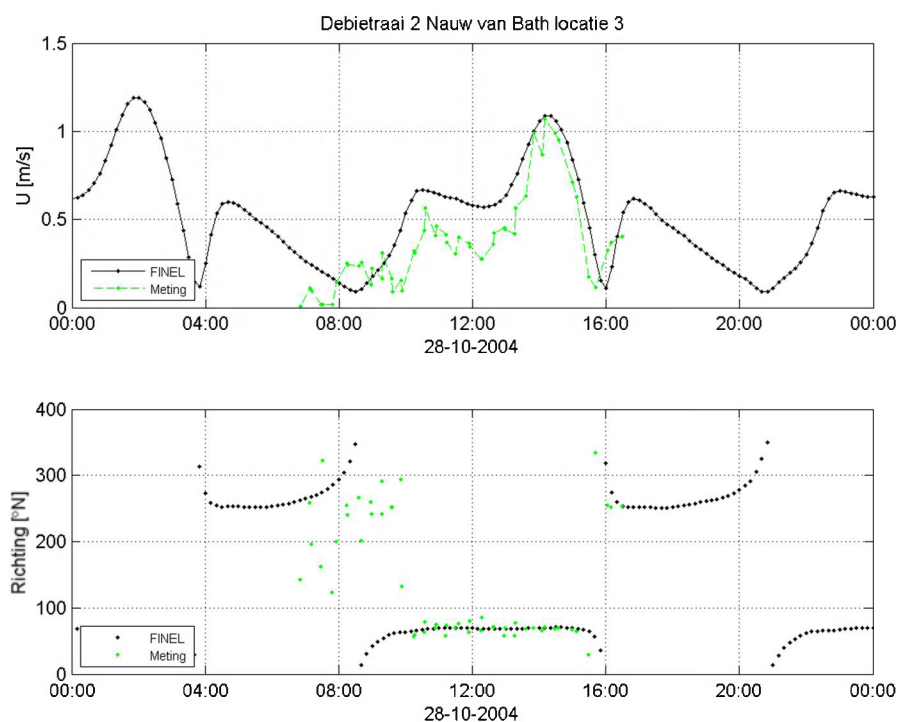
Figuur 4.8: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 6 van debietraai 1



Figuur 4.9: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 1 van debietraai 2



Figuur 4.10: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 2 van debietraai 2



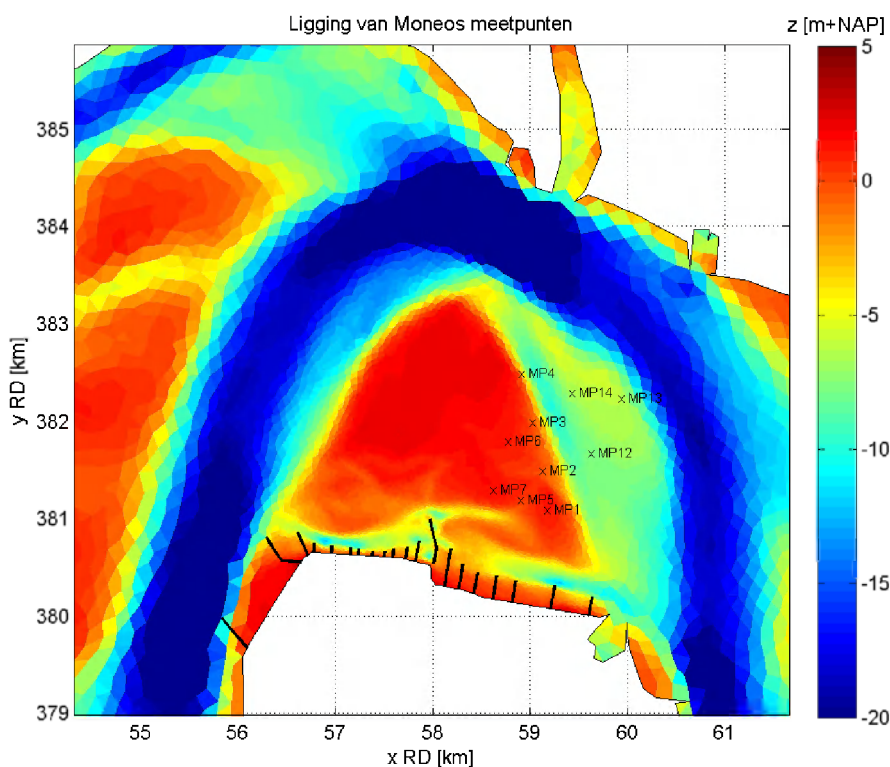
Figuur 4.11: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 3 van debietraai 2

## 4.2 Plaat van Ossensisse

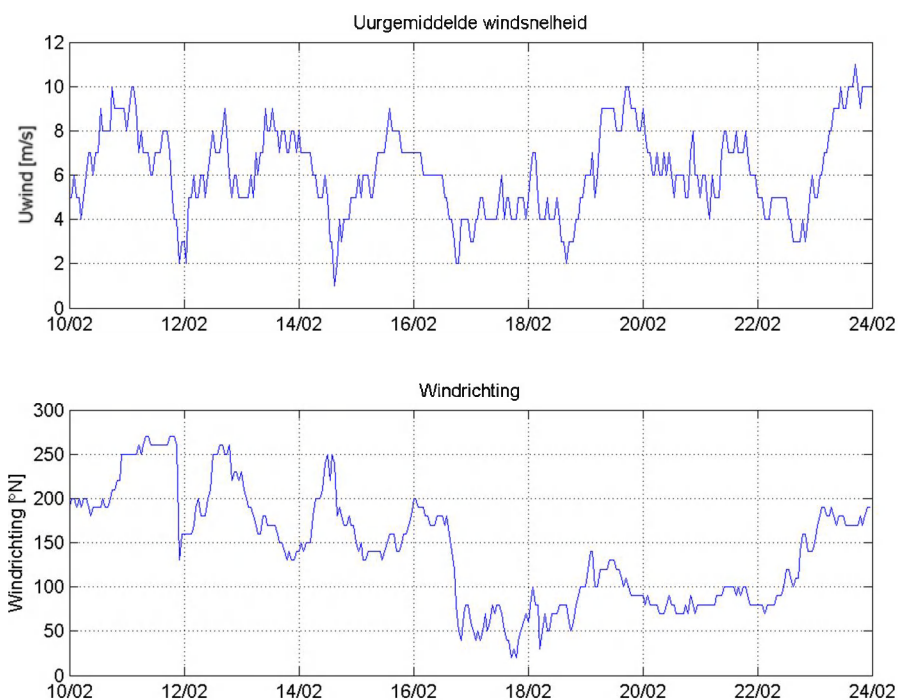
### 4.2.1 Beschikbare metingen

Voor een vergelijking van stroomdata is gebruik gemaakt van stroomdata verkregen met het Moneos monitoringsprogramma op de Plaat van Ossensisse (bron: Rijkswaterstaat Zeeland – Meetadviesdienst). In het kader van dit programma zijn tussen 10 en 24 februari 2011 op een aantal locaties op de Plaat van Ossensisse stroommetingen verricht. Een overzicht van de ligging van de meetlocaties is gegeven in Figuur 4.12. De validatie richt zich op locaties MP01, MP06, MP07, MP12 en MP13. Ter referentie is in Figuur 4.13 de windsnelheid en -richting voor februari 2011 weergegeven.

Hoewel per locatie verticale snelheidsprofielen zijn gemeten, betreft de validatie een vergelijking van dieptegemiddelde snelheden omdat het FINEL2d model 'slechts' dieptegemiddelde snelheden berekent.



Figuur 4.12: Overzicht van de ligging van de Moneos meetpunten op de Plaat van Ossensisse

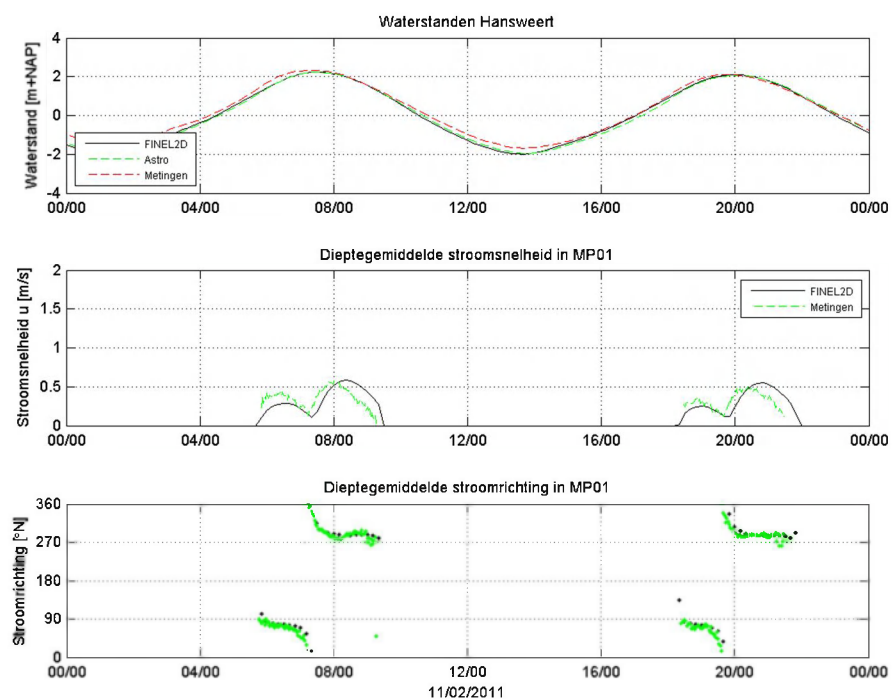


Figuur 4.13: Windcondities in Vlissingen in februari 2011 (bron: [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl))

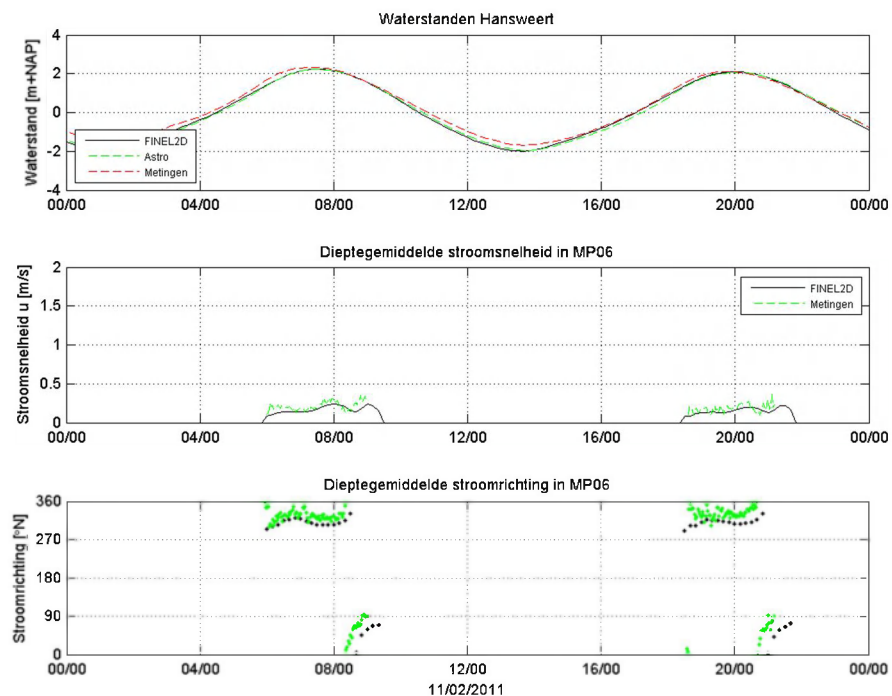
#### 4.2.2 Vergelijking met FINEL2d

In Figuur 4.20 tot en met Figuur 4.29 is voor de genoemde locaties de vergelijking tussen de gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheid en richting op 11 of 20 februari 2011 gegeven. De locaties betreffen een mix van diepe punten (tot -10m NAP) en ondiepe punten (rond NAP)

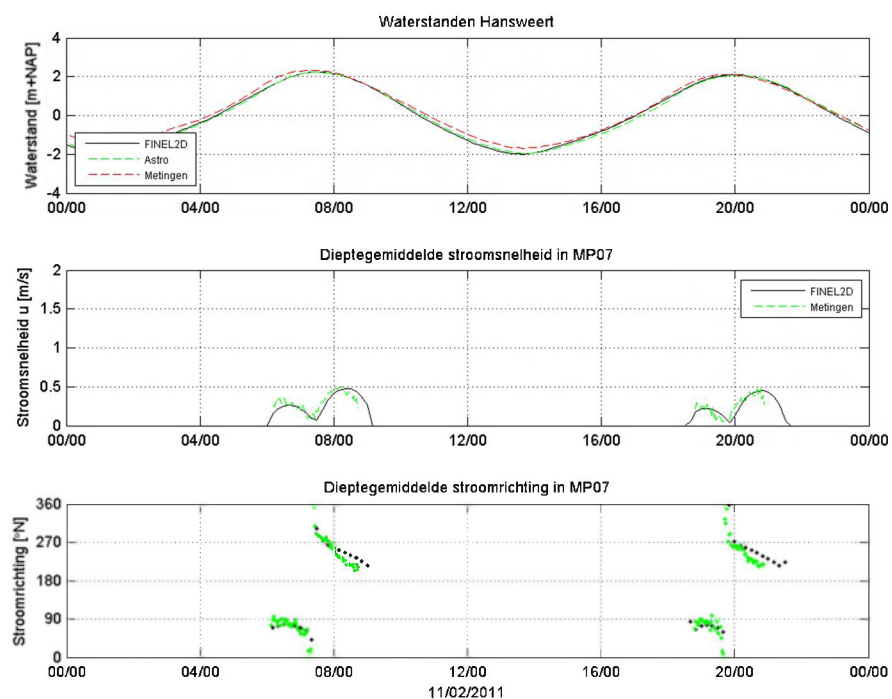
De gesimuleerde stroomsnelheden en richtingen komen over het algemeen goed overeen met de gemeten waarden. Dit geldt voor zowel voor de grootte als voor de fase.



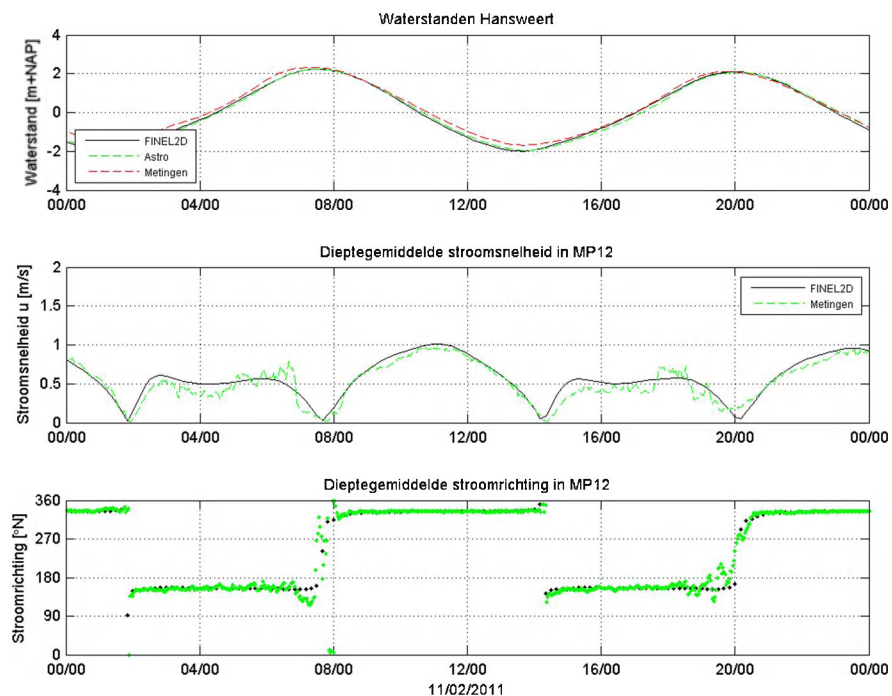
Figuur 4.14: Gemeten en berekende waterstanden, dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie MP01 op 11 februari 2011



Figuur 4.15: Gemeten en berekende waterstanden, dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie MP06 op 11 februari 2011

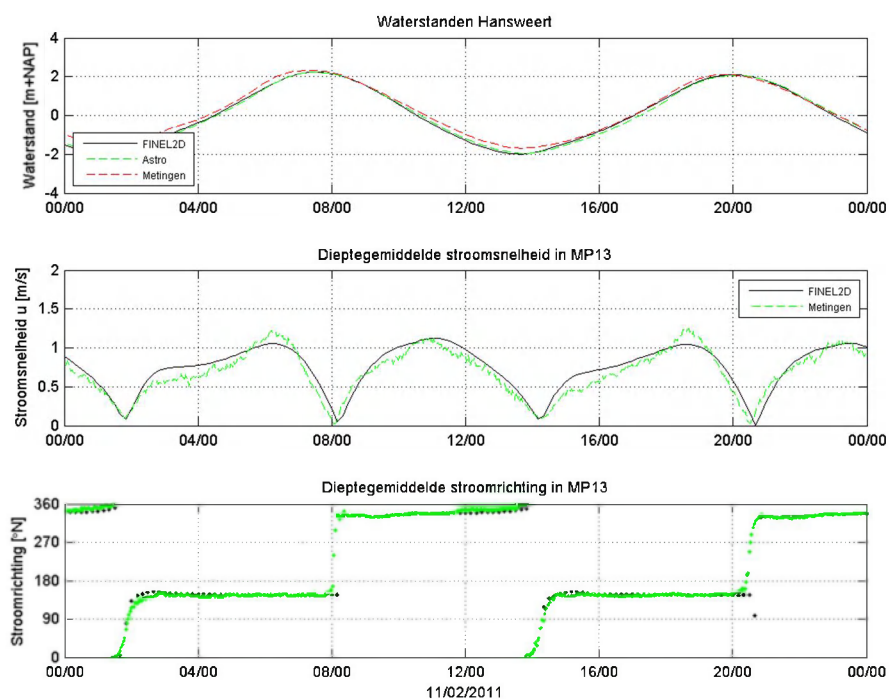


Figuur 4.16: Gemeten en berekende waterstanden, dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie MP07 op 11 februari 2011

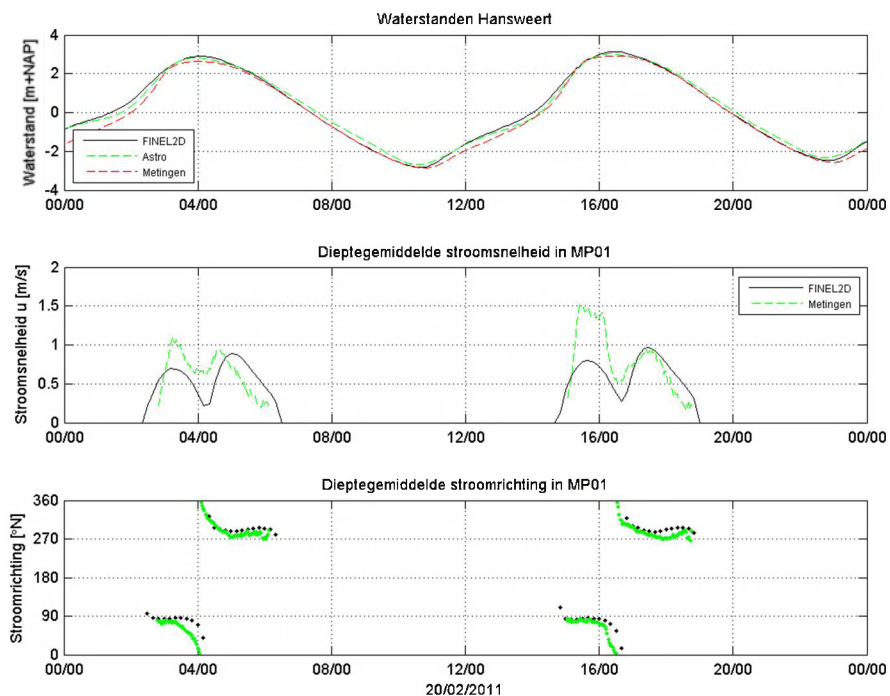


Figuur 4.17: Gemeten en berekende waterstanden, dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie MP12 op 11 februari 2011

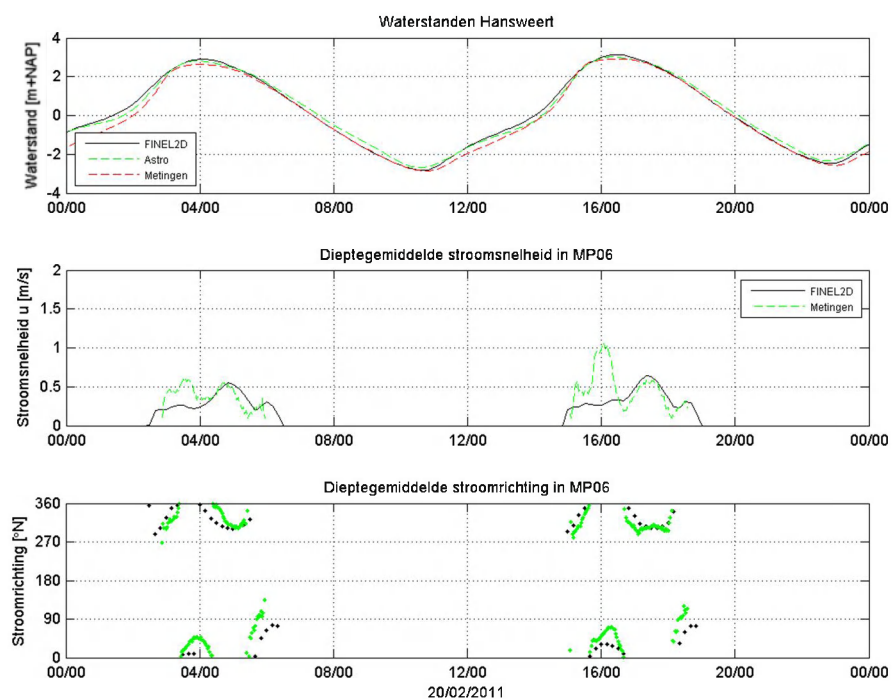




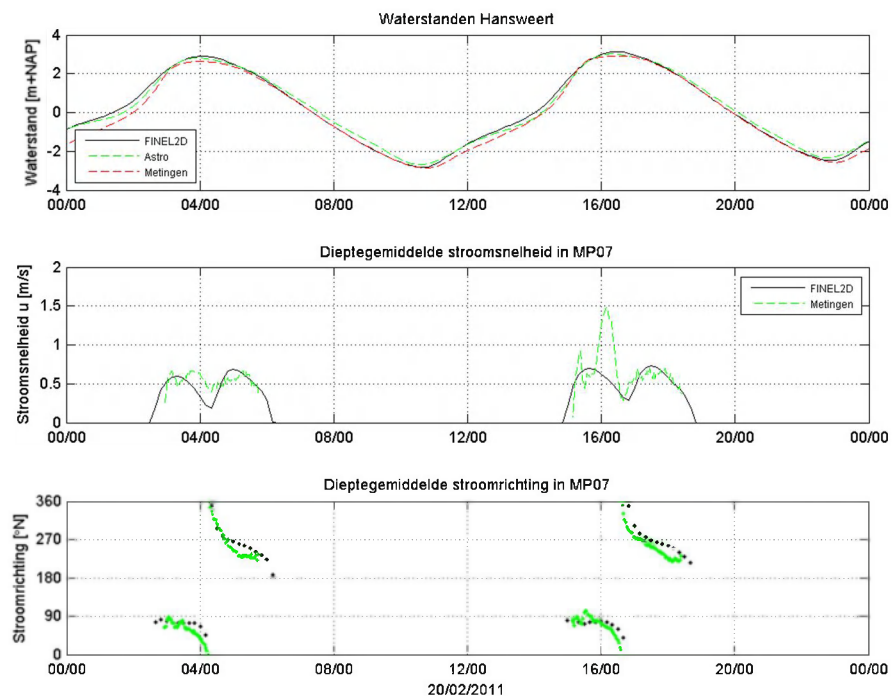
Figuur 4.18: Gemeten en berekende waterstanden, dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie MP13 op 11 februari 2011



Figuur 4.19: Gemeten en berekende waterstanden, dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie MP01 op 20 februari 2011

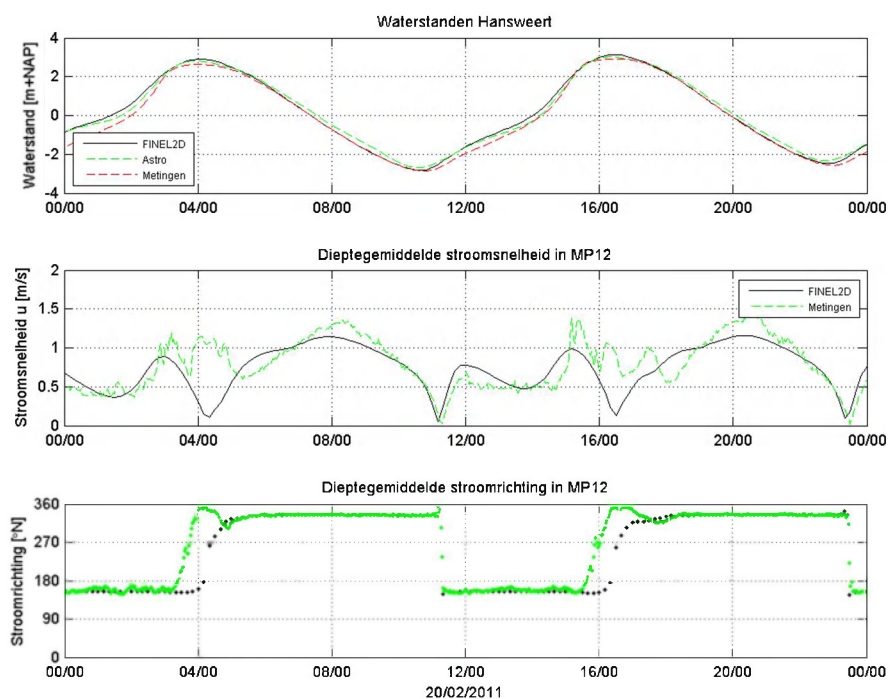


Figuur 4.20: Gemeten en berekende waterstanden, dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie MP06 op 20 februari 2011

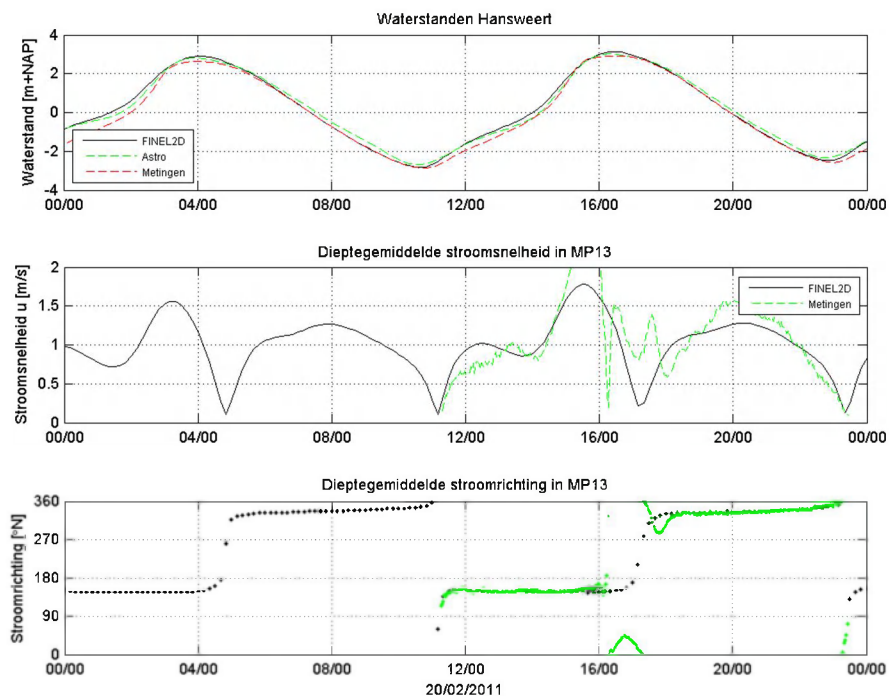


Figuur 4.21: Gemeten en berekende waterstanden, dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie MP07 op 20 februari 2011





Figuur 4.22: Gemeten en berekende waterstanden, dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie MP12 op 20 februari 2011



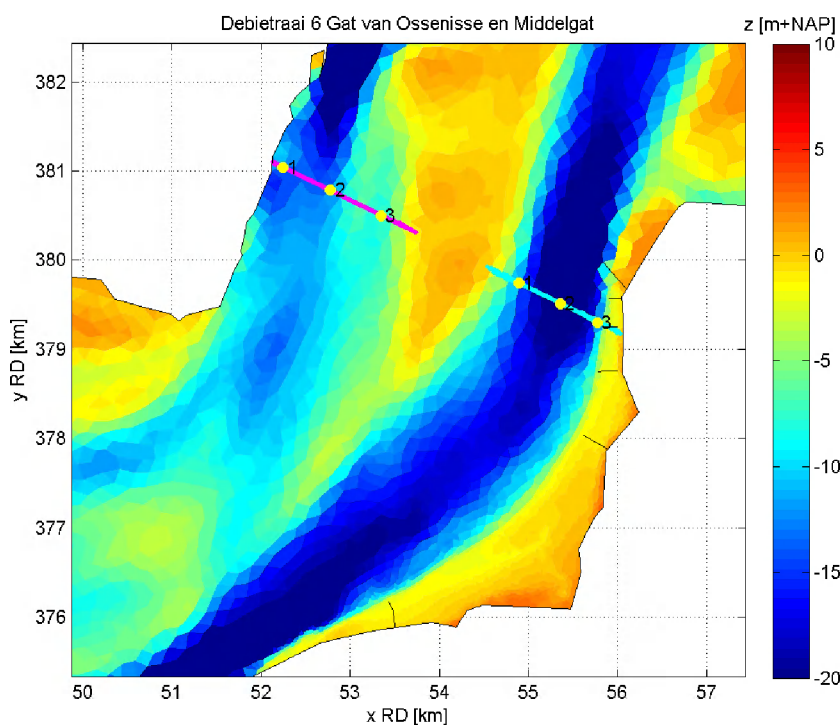
Figuur 4.23: Gemeten en berekende waterstanden, dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie MP13 op 20 februari 2011

Een gevoeligheidsstudie is uitgevoerd door andere bodemruwheden te gebruiken. Ook voor de Plaat van Ossensisse geldt dat geen van de andere berekeningen een structureel betere vergelijking met de metingen opleverde. Een globale ruwheid van 1 cm zoals eerder gevonden tijdens het afregelen van de waterstanden geeft ook hier de beste resultaten.

### 4.3 Gat van Ossensisse/ Middelgat

#### 4.3.1 Beschikbare metingen

In deze paragraaf worden gemeten stroomsnelheden van debietraai 6 vergeleken met het FINEL2d model. De debietmetingen in raai 6 worden gevormd door het Gat van Ossensisse en het Middelgat, zie Figuur 4.24. De debietmetingen zijn uitgevoerd op 3 oktober 2004 (Bron: Rijkswaterstaat Zeeland – Meetadviesdienst). Ten behoeve van de vergelijking met het FINEL2d model zijn per (sub)raai drie punten gedefinieerd waarin de gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden met elkaar vergeleken zullen worden. Deze punten zijn ook aangegeven in Figuur 4.24.



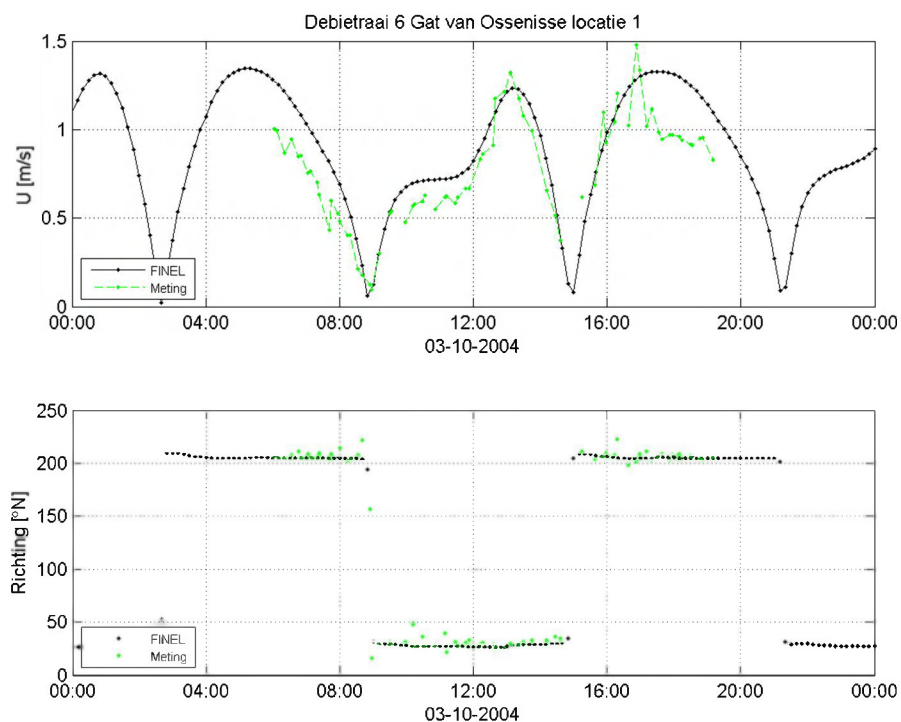
Figuur 4.24: Debietraai 6: Gat van Ossensisse en Middelgat

#### 4.3.2 Vergelijking met FINEL2d

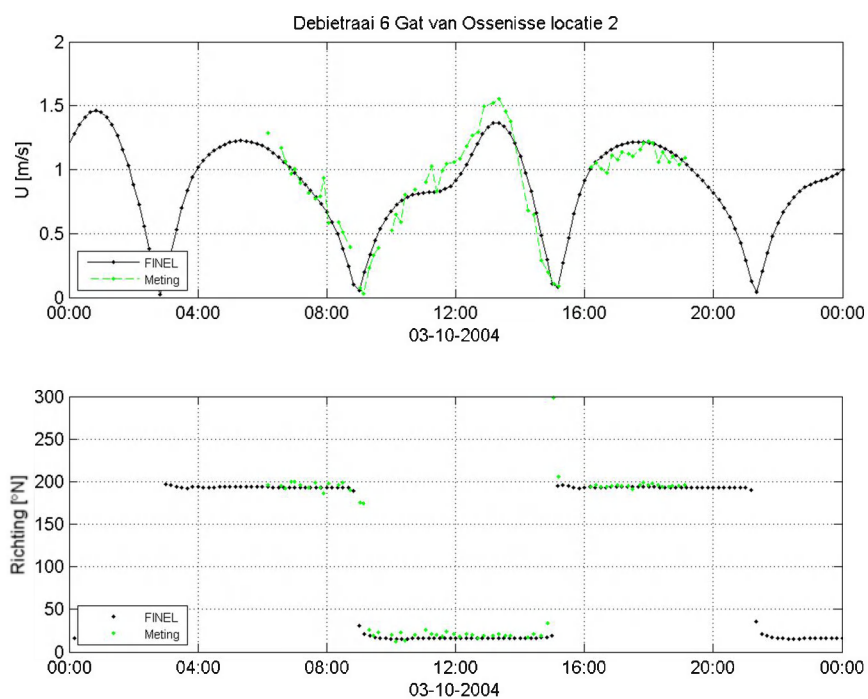
In Figuur 4.25 tot en met Figuur 4.33 is de vergelijking tussen de gemeten en berekende snelheden in de drie locaties in het Gat van Ossensisse gegeven. De figuren illustreren dat in locatie 2, de locatie in het midden van de geul, de gesimuleerde snelheden nagenoeg gelijk zijn aan de gemeten snelheden. In locaties 1 en 3, die wat minder diep gelegen zijn, is de overeenkomst minder goed. In locatie 1 worden de gesimuleerde snelheden tot 0,2 m/s

onderschat. In locatie 3 vindt soms onderschatting, soms overschatting van de snelheden plaats. Hierbij moet worden opgemerkt dat de stromingen op de ondiepere locaties gevoelig zijn voor de exacte bodemligging. Kleine verschillen tussen de daadwerkelijke bodemligging ten tijde van de metingen en de bodemligging, zoals deze in het model is opgenomen, kunnen al snel tot verschillen in stroomsnelheden leiden. Dit in ogenschouw nemende komen de gesimuleerde stromingen goed overeen met de gemeten.

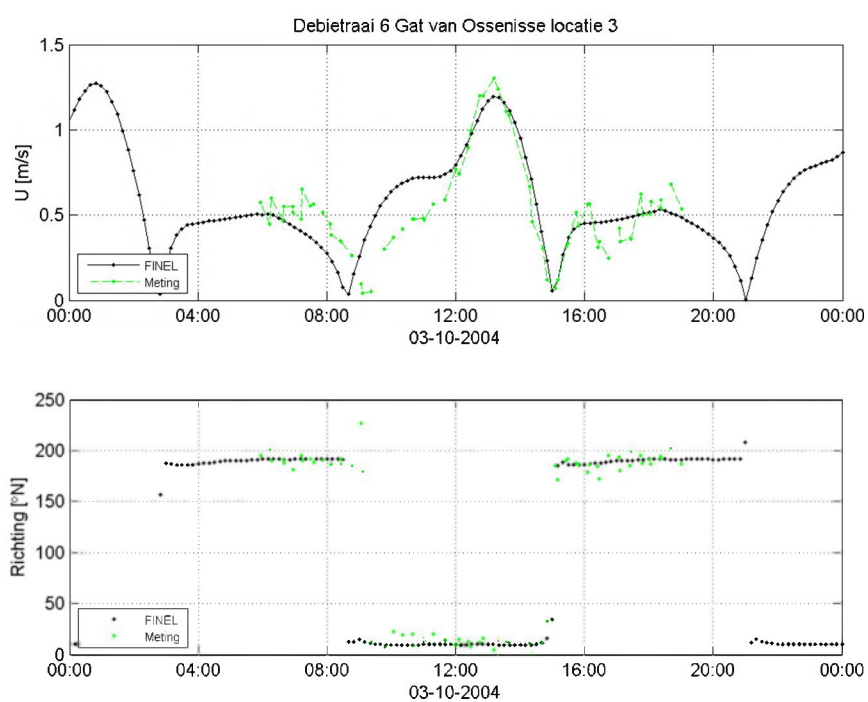
Figuur 4.34 tot en met 4.36 tonen de resultaten van de drie punten in het Middelgat. De stroomsnelheden komen goed overeen met de metingen.



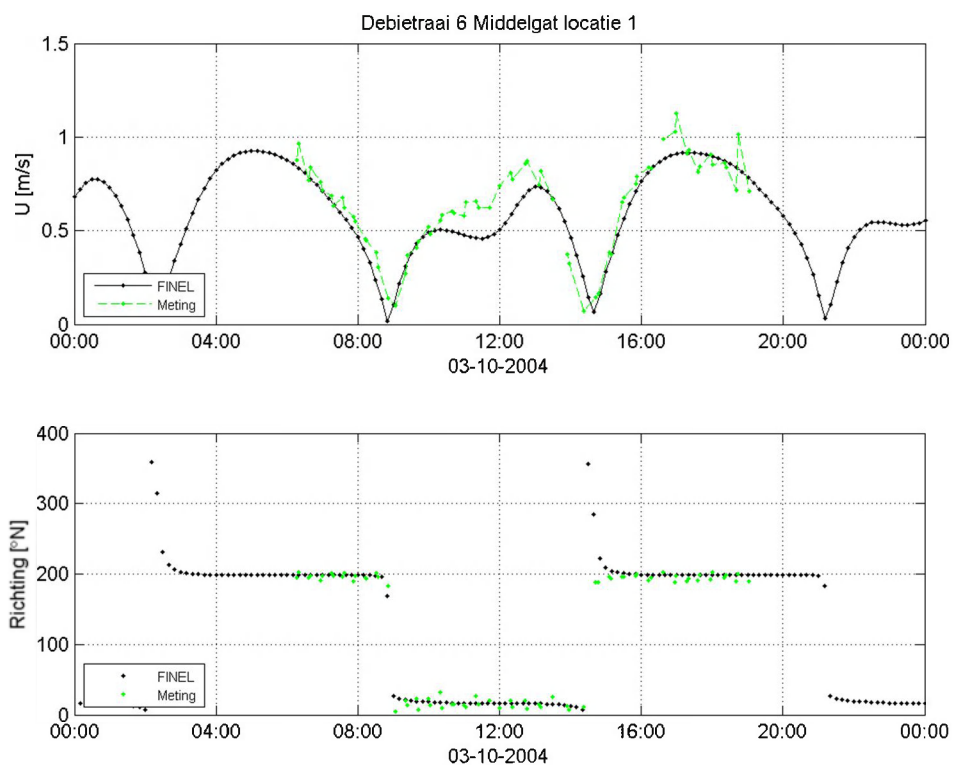
Figuur 4.25: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 1 van debietraai 6 Gat van Ossenisse



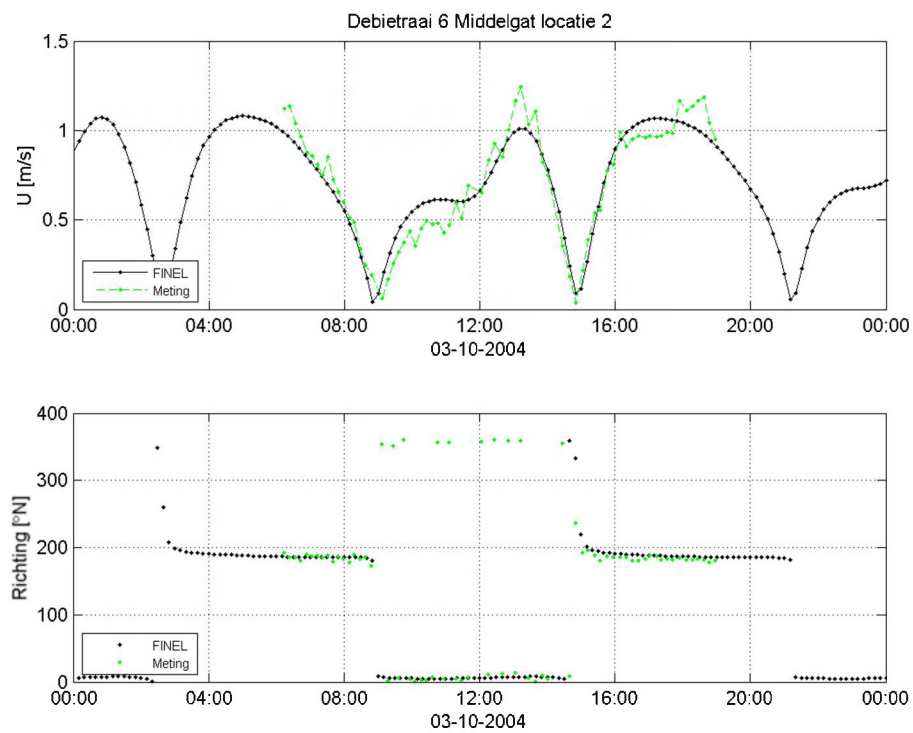
Figuur 4.26: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 2 van debietraai 6 Gat van Ossensisse



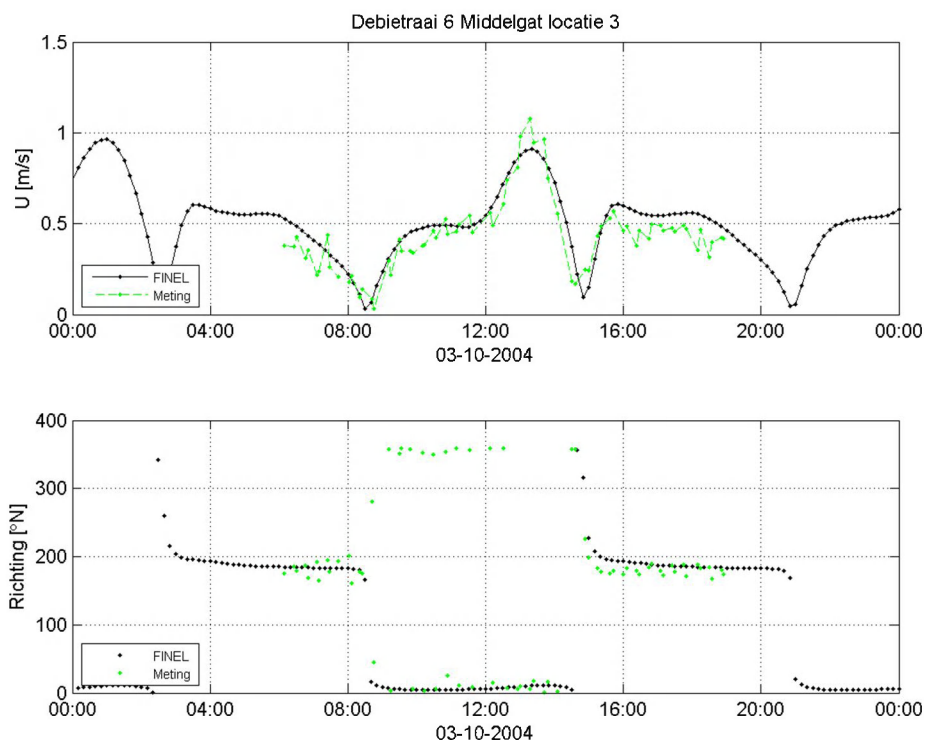
Figuur 4.27: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 3 van debietraai 6 Gat van Ossensisse



Figuur 4.28: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 1 van debietraai 6 Middelgat



Figuur 4.29: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 2 van debietraai 6 Middelgat



Figuur 4.30: Gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden en richtingen in locatie 3 van debietraai 6 Middelgat

#### 4.4 Conclusie

Het FINEL2d model is vergeleken met stroommetingen op de volgende locaties:

- Debietraaien bij Bath
- Stroommetingen Plaat van Ossensisse
- Debietraaien bij Gat van Ossensisse/ Middelgat

Over het algemeen kan geconcludeerd worden dat het model goed in staat is om de gemeten stroomsnelheden te reproduceren. In alle gevallen zijn de uitkomsten acceptabel. De vaak kleine afwijkingen zijn veelal te verklaren door afwijkingen in de bodemligging. In het model wordt een bodemligging van dat jaar gebruikt, maar er kan op het moment van meten een iets andere ligging zijn. De stroomsnelheden van het model zijn namelijk gevoelig voor een iets andere bodemligging.

Geconcludeerd kan worden dat FINEL2d goed in staat is om de waterstanden en stroomsnelheden te reproduceren. De optimalisatie van de waterbeweging is hiermee afgerond.

## 5 WATERBEWEGING: VALIDATIE STROOMSNELHEDEN PUT VAN BORSSELE

In Hoofdstuk 4 is de validatie van de stroomsnelheden van het FINEL2d Westerschelde model beschreven. Hierbij zijn berekende en gemeten stroomsnelheden op verschillende locaties in de Westerschelde vergeleken. Geconcludeerd is dat het FINEL2d goed in staat is de stroomsnelheden op de behandelde locaties te reproduceren.

Naast de metingen die in Hoofdstuk 4 behandeld zijn, is er een dataset beschikbaar van de Put van Borssele, zie paragraaf 5.1. Omdat in de meetresultaten van de Put van Borssele driedimensionale effecten zijn geconstateerd, wordt de vergelijking tussen de metingen en de modelresultaten niet alleen met het FINEL2d model (paragraaf 5.2) uitgevoerd, maar ook met het in ontwikkeling zijnde FINEL3d model (paragraaf 5.3).

### 5.1 Beschikbare metingen

Op 28 november 2011 heeft Rijkswaterstaat Zeeland – Meetadviesdienst varende stroommetingen uitgevoerd in de Put van Borssele. Hierbij is langs vier verschillende raaien gevaren, zie Figuur 5.3. Bij maximale vloedstroming zijn snelheden tot 2 m/s gemeten. Opvallend is dat deze snelheden in het onderste deel van de waterkolom voorkomen.

Ten behoeve van de vergelijking met de FINEL2d en FINEL3d modellen zijn langs deze raaien enkele punten gedefinieerd waarin de gemeten en berekende dieptegemiddelde snelheden met elkaar vergeleken zullen worden. Deze punten zijn ook aangegeven in Figuur 5.1.

### 5.2 Vergelijking met FINEL2d

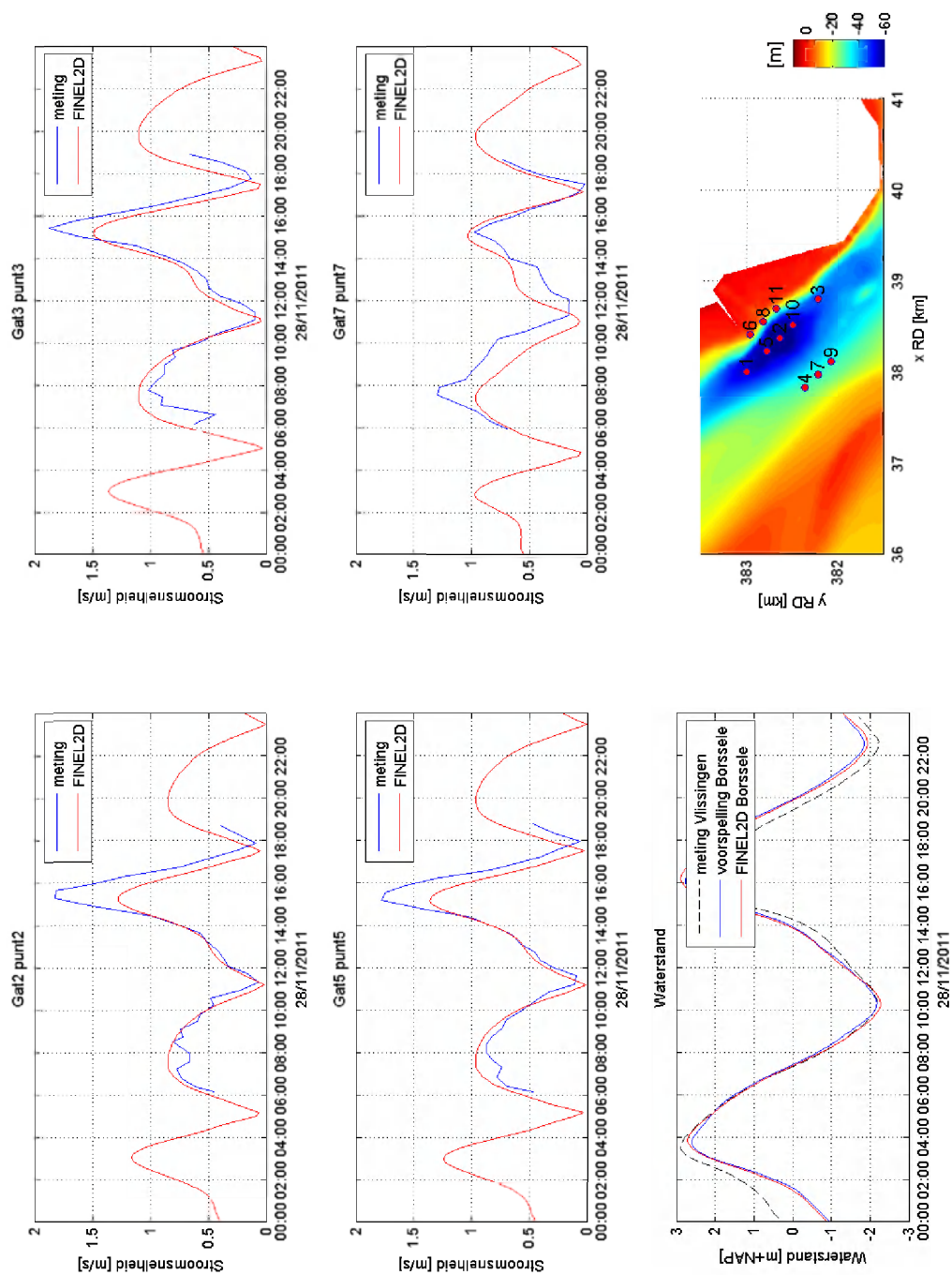
In het kader van de validatie van het FINEL2d model, is een simulatie uitgevoerd om de meetresultaten in de Put van Borssele te reproduceren. In totaal zijn twee dagen doorgerekend, waarbij de eerste dag bedoeld is om de waterbeweging in te laten spelen.

In de eerste vier panelen van Figuur 5.1 zijn tijdreeksen van zowel de gemeten als gemodelleerde absolute stroomsnelheid weergegeven. De locaties waarvoor de tijdreeksen gelden zijn weergegeven in het zesde paneel. In het vijfde paneel is de gemodelleerde en voorspelde waterstand bij Borssele weergegeven. De gemeten waterstand bij Borssele is niet beschikbaar. Om toch een inschatting te krijgen van de afwijking op het astronomisch getij, is de gemeten waterstand van het nabij gelegen Vlissingen aan het paneel toegevoegd.

Wanneer de voorspelde en gemodelleerde waterstand vergeleken worden, blijkt dat deze erg goed overeen komen. Er is geen faseverschil en de waterstandsverschillen bedragen maximaal enkele centimeters.

In paneel één tot en met vier, waarin de absolute stroomsnelheid tegen de tijd is uitgezet, is in alle gevallen een faseverschil te herkennen. Bij de overgang van vloed naar eb is dit faseverschil, dat ongeveer 20 minuten bedraagt, groter dan bij de overgang van eb naar vloed. In de panelen, met uitzondering van paneel vier, is eveneens te zien dat de maximale vloedsnelheid door FINEL2d wordt onderschat. De modelresultaten met betrekking tot de maximale ebsnelheid zijn daarentegen vrij goed. In paneel vier geldt het omgekeerde: hier wordt de maximale ebsnelheid door het model onderschat, en de maximale vloedsnelheid juist vrij aardig gereproduceerd. De vorm van de getijcurve komt in alle gevallen goed overeen.



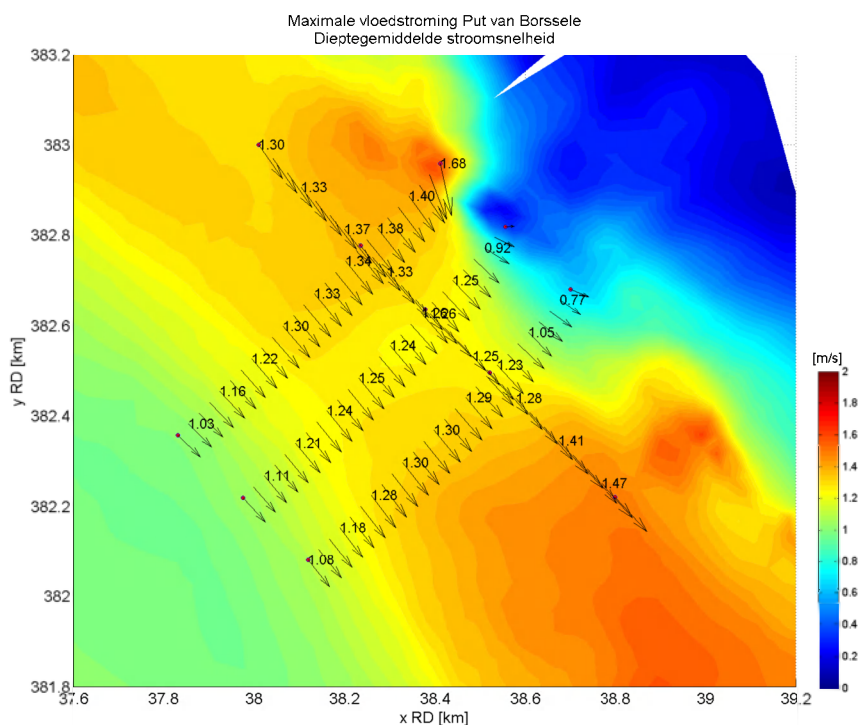


Figuur 5.1: Tijdreeksen van gemeten en gemodelleerde absolute stroomsnelheden op verschillende locaties in de put van Borsselle. De waterstand en locaties behorende bij de gepresenteerde tijdreeksen zijn eveneens weergegeven.



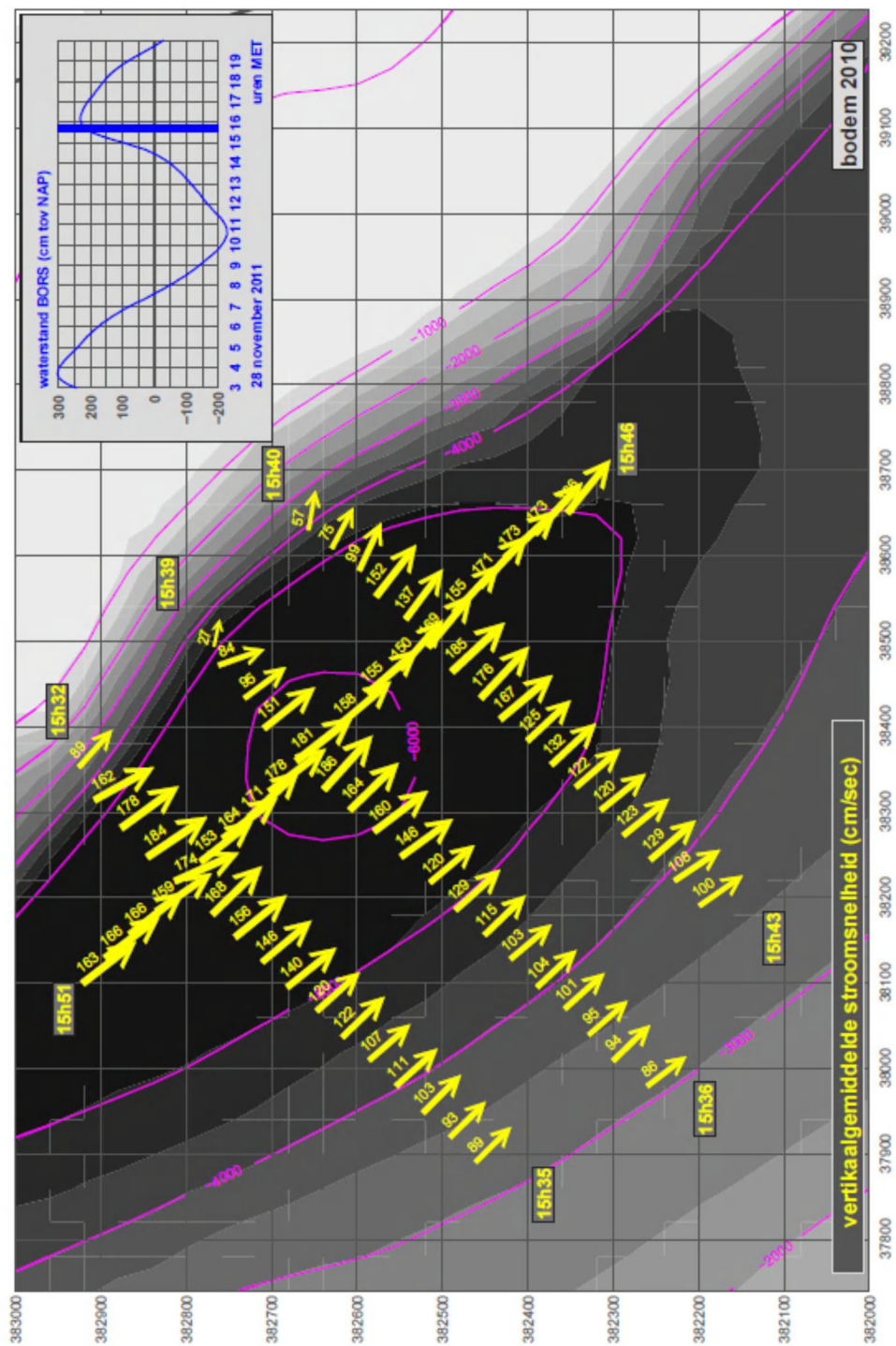
De gemeten dieptegemiddelde stroomsnelheid tijdens maximale vloedstroming langs de op 28 november 2011 gevaren meetraaien is gepresenteerd in Figuur 5.3. De modelresultaten langs deze meetraaien, eveneens voor maximale vloedstroming, is weergegeven in Figuur 5.2. De stroomsnelheid berekend met behulp van FINEL2d is in vrijwel het gehele gebied lager dan de gemeten stroomsnelheid. In het zuidwestelijke deel komt de stroomsnelheid echter goed overeen. Dit is in overeenstemming met de waarnemingen in Figuur 5.1, waarvan het vierde paneel de tijdserie van een punt in het zuidwestelijke deel van de Put van Borssele representeert.

Er is geen tijdserie van de stroomrichting beschikbaar, waardoor de gemeten en gemodelleerde stroomrichting alleen met behulp van Figuur 5.2 en Figuur 5.3 vergeleken kunnen worden. Opvallend in beide figuren is de stroomrichting in het noordoostelijk deel van de Put van Borssele, daar deze afwijkt van de hoofdstroomrichting in de rest van het gebied. Zowel de meting als het model geeft soortgelijke resultaten. De stroomsnelheid wordt vrij aardig gereproduceerd.



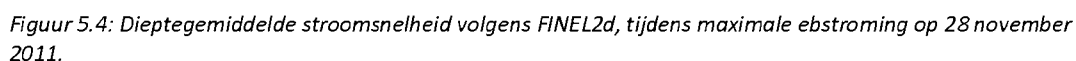
Figuur 5.2: Dieptegemiddelde stroomsnelheid volgens FINEL2d, tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011.

stroommeting Put van Borssele 28 november 2011

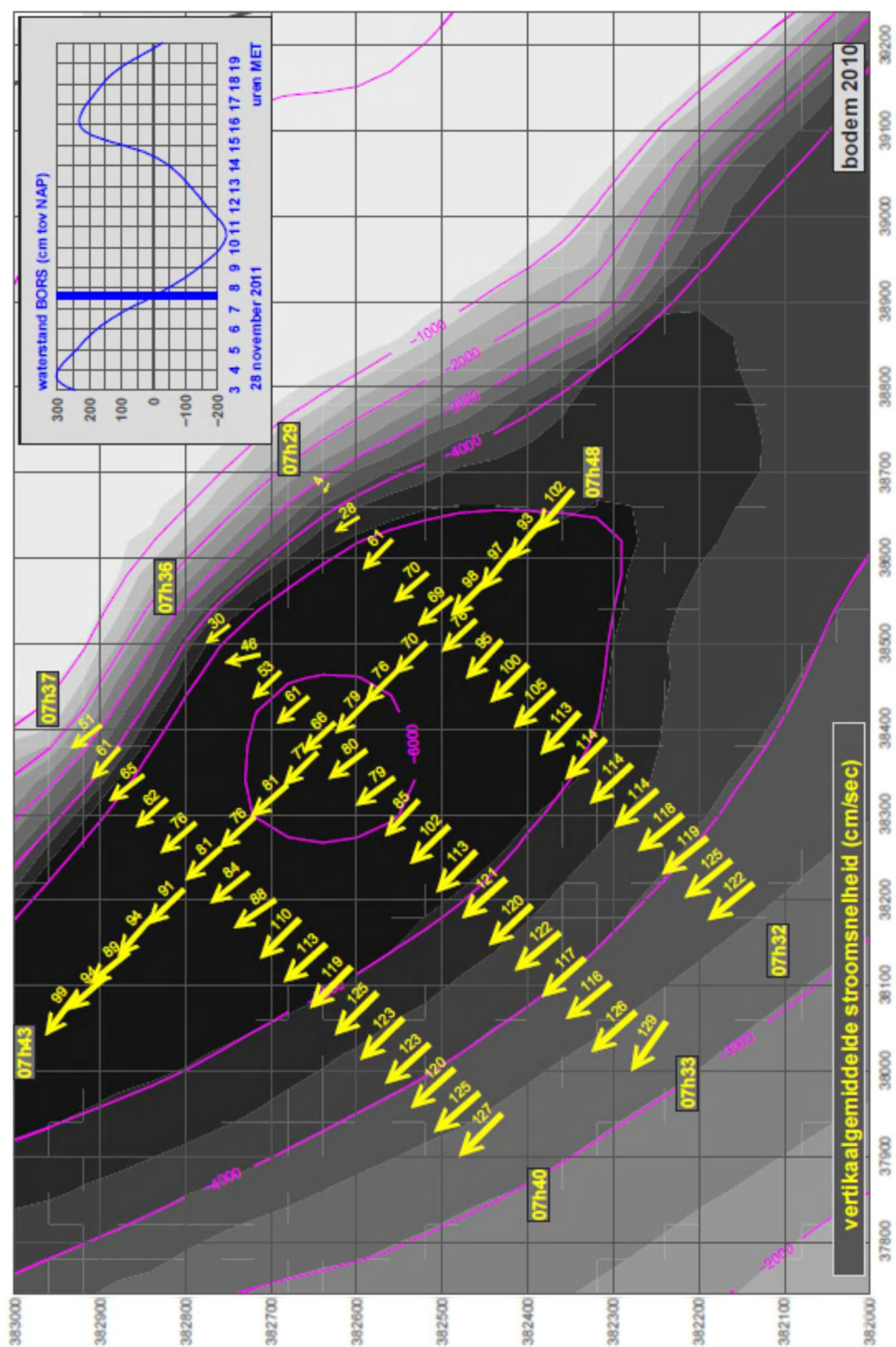


Figuur 5.3: Gemeten dieptegemiddelde stroomsnelheid, tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011.  
Bron: Rijkswaterstaat Zeeland – Meetadviesdienst

Er is geen tijdserie van de stroomrichting beschikbaar, waardoor de gemeten en gemodelleerde stroomrichting alleen met behulp van Figuur 5.4 en Figuur 5.5 vergeleken kunnen worden. Zowel de meting als het model geeft soortgelijke resultaten.



# stroommeting Put van Borssele 28 november 2011



Figuur 5.5: Gemeten dieptegemiddelde stroomsnelheid, tijdens maximale ebstroming op 28 november 2011.  
Bron: Rijkswaterstaat Zeeland – Meetadviesdienst.



Geconcludeerd kan worden dat het modelleren van de stroming in de Put van Borssele betrekkelijk goed gaat. Tijdens vloed wordt de maximale stroomsnelheid echter niet gereproduceerd. Uit de metingen blijkt echter dat de stroming in het onderste deel van de waterkolom zitten. Daar FINEL2d een dieptegemiddeld stromingsmodel is, is dit effect niet zichtbaar in de resultaten. Tijdens eb vertonen de metingen een snelheidsverdeling vergelijkbaar met een log-profiel. De resultaten van FINEL2d komen dan goed overeen met de meetresultaten.

Overigens is er een faseverschil van ongeveer 20 minuten aanwezig tussen de berekende en gemeten stroming.

### 5.3 Vergelijking met FINEL3d

#### 5.3.1 Modelopzet en modelinstellingen

FINEL3d is een numeriek volledig driedimensionaal stromings- en sedimenttransportmodel, gebaseerd op de eindige elementen methode. FINEL3d rekent met ongestructureerde roosters: de driehoekige elementen variëren in grootte en vorm. Hierdoor bestaat de vrijheid om in interessegebieden lokaal de resolutie te verhogen, zodat de grootste rekeninspanning daar plaatsvindt.

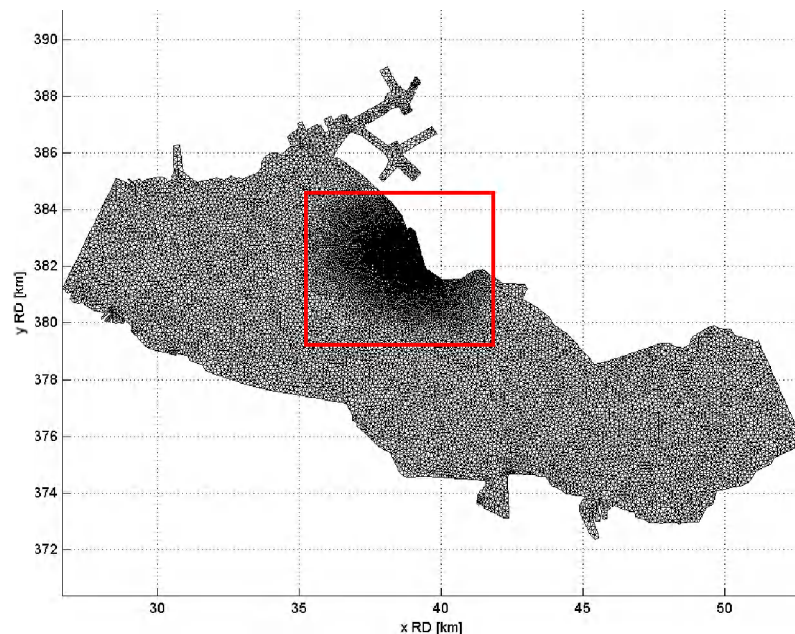
Het FINEL3d Westerschelde model beslaat enkel een deel van de Westerschelde,, in tegenstelling tot het FINEL2d Westerschelde model, dat ook een deel van de Noordzee, de hele Westerschelde, de Beneden-Zeeschelde en een deel van de Boven-Zeeschelde en de Vlaamse getijdenrivieren beslaat. Op de randen van het model worden randvoorwaarden opgelegd: aan westzijde een waterstand en aan de oostzijde een debiet, zie Figuur 5.6. De randvoorwaarden zijn bepaald met behulp van het FINEL2d Westerschelde model.



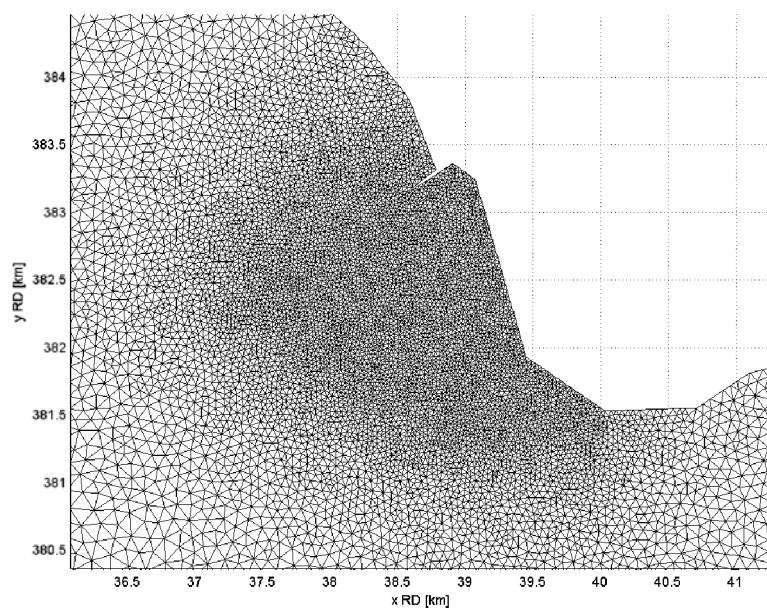
Figuur 5.6: Rekendomein en randvoorwaarden Westerschelde model.

Voor het rekenrooster geldt dat de grootte van elementzijde voor het overgrote deel van de Westerschelde 125 m bedraagt, zie Figuur 5.7. Nabij de Put van Borssele, het interessegebied in deze studie, is het rooster verfijnd naar zijden van 25 m, zie Figuur 5.8.

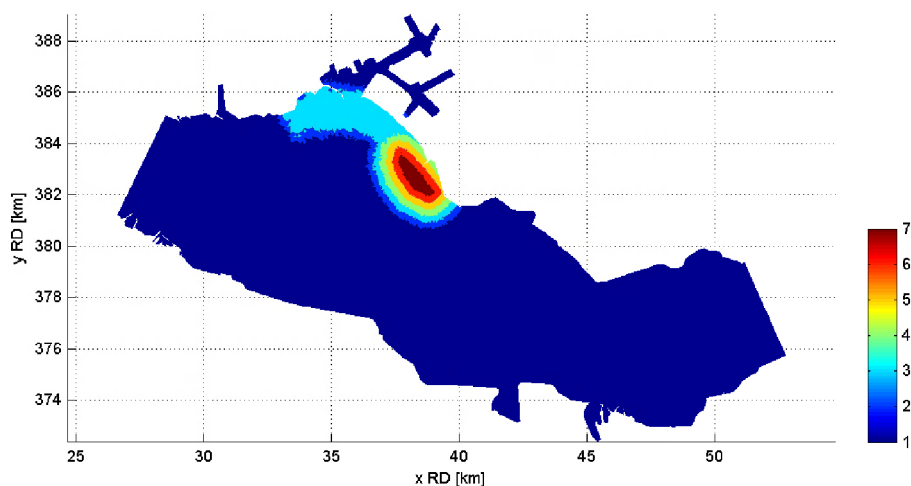
Ter plaatse van de Put van Borssele is verticaal verdeeld in zeven lagen. Het aantal lagen gaat stapsgewijs over naar uiteindelijk slechts één laag in de verticaal ter plaatste van de modelrand. Om eventuele bochtstroming in de Honte goed te modelleren, is ter plaatste van Vlissingen het aantal lagen in de verticaal hoger dan één gehouden. De verdeling van de hoeveelheid lagen over het modeldomein is gepresenteerd in Figuur 5.9.



*Figuur 5.7: Rekenrooster FINEL3d Westerschelde model. Het gebied binnen het rode kader is vergroot weergegeven in onderstaande figuur.*



*Figuur 5.8: Rekenrooster ter plaatse van de Put van Borssele.*



Figuur 5.9: Aantal lagen in het rekenrooster.

Om turbulentie in de modelberekening in beschouwing te kunnen nemen, worden de wervels gemodelleerd met behulp van een turbulentiemodel. In dit geval is gekozen voor een simpel turbulentiemodel, waarbij de viscositeit door het gehele domein constant is. Wel wordt er onderscheid gemaakt tussen de horizontale en verticale viscositeit. De horizontale viscositeit bedraagt  $1 \text{ m}^2/\text{s}$ ; de verticale viscositeit  $0,01 \text{ m}^2/\text{s}$ .

### 5.3.2 Resultaten

Met behulp van het nog niet gekalibreerde FINEL3d is een simulatie uitgevoerd om de meetresultaten in de Put van Borssele te reproduceren. In totaal zijn twee dagen doorgerekend, waarbij de eerste dag bedoeld is om de waterbeweging in te laten spelen. De toegepaste tijdstap bedraagt 60 seconden.

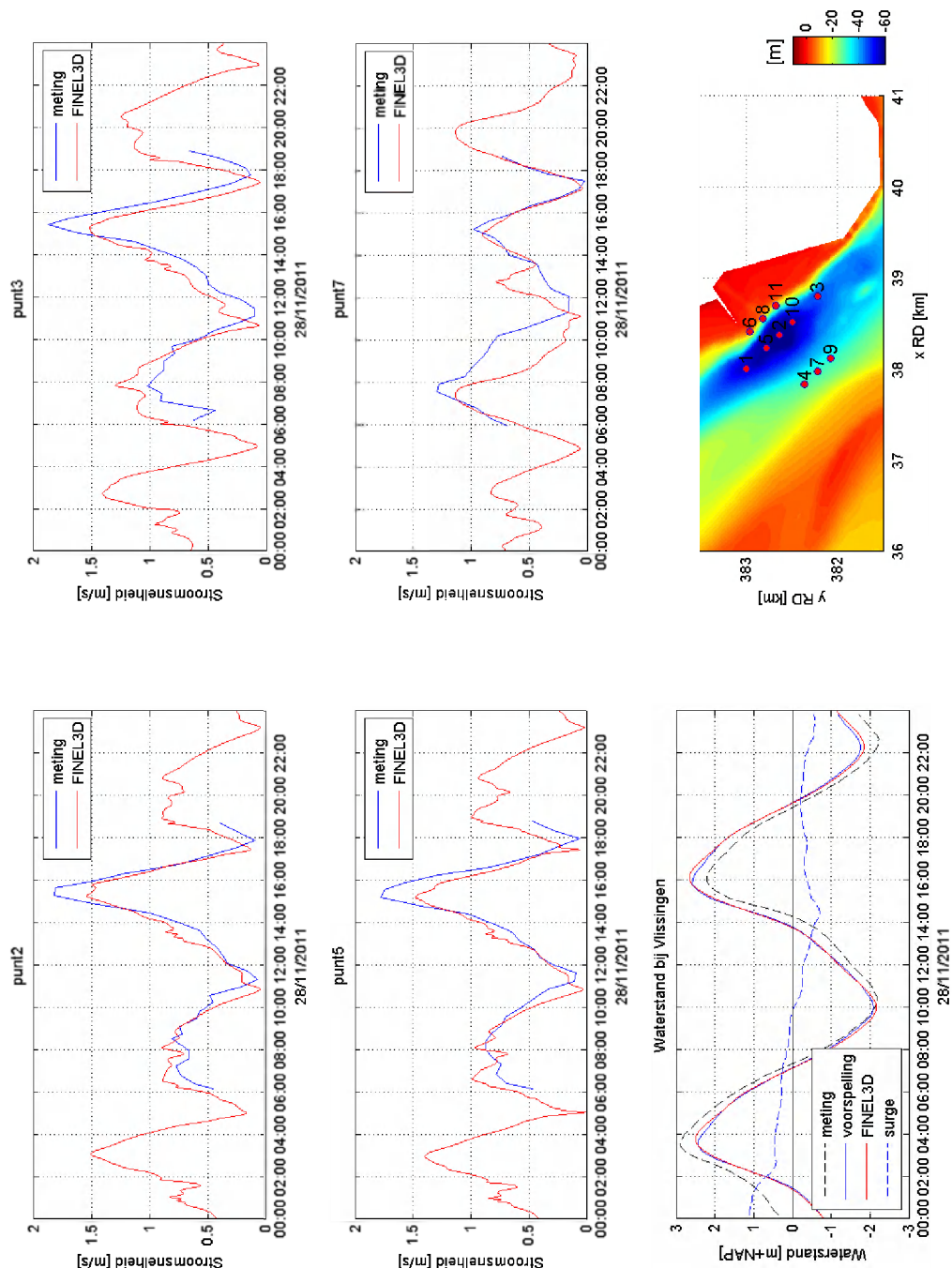
In de eerste vier panelen van Figuur 5.10 zijn tijdreeksen van zowel de gemeten als de met FINEL3d gemodelleerde absolute stroomsnelheid weergegeven. Evenals in Figuur 5.1, zijn de locaties waarvoor de tijdreeksen gelden weergegeven in het zesde paneel. In het vijfde paneel is de gemodelleerde en voorspelde waterstand bij Borssele weergegeven. De gemeten waterstand bij Borssele is niet beschikbaar. Om toch een inschatting te krijgen van de afwijking op het astronomisch getij, is de gemeten waterstand van het nabij gelegen Vlissingen aan het paneel toegevoegd.

Wanneer de voorspelde en gemodelleerde waterstand vergeleken worden, blijkt dat deze erg goed overeen komen. Er is geen faseverschil, en de waterstandsverschillen bedragen maximaal enkele centimeters.

Opvallend is dat, in tegenstelling tot de resultaten behaald met FINEL2d, het verloop van de stroomsnelheid in de tijd niet glad is. Mogelijk is dit een gevolg van de gekozen instellingen van het turbulentiemodel.

In paneel één tot en met drie, waarin de absolute stroomsnelheid tegen de tijd is uitgezet, is een faseverschil te herkennen. Het faseverschil bedraagt steeds 20 à 30 minuten. In het vierde paneel is echter geen faseverschil aanwezig. Het faseverschil is deels te verklaren aan de hand van de randvoorwaarden, die rechtstreeks uit de FINEL2d simulatie volgen. In de 2D resultaten

was eveneens een faseverschil herkenbaar, wat door middel van de randvoorwaarden automatisch ook in de 3D resultaten terecht komt. Het faseverschil is met de 3D simulatie wel groter geworden.



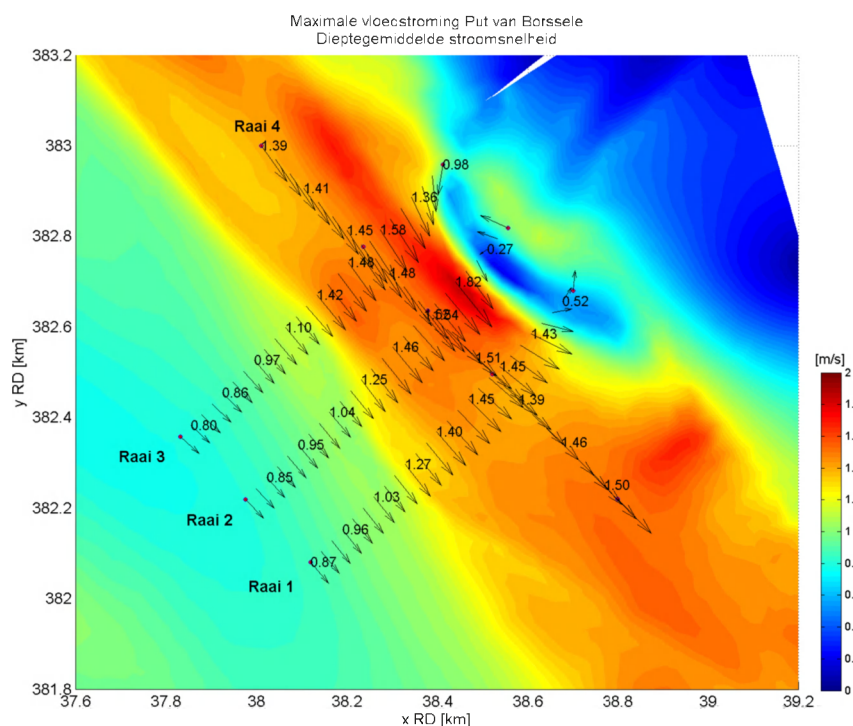
*Figuur 5.10: Tijdreeksen van gemeten en met FINEL3d gemodelleerde absolute stroomsnelheden op verschillende locaties in de put van Borsselle. De waterstand en locaties behorende bij de gepresenteerde tijdreeksen zijn eveneens weergegeven.*



In de panelen, met uitzondering van paneel vier, is te zien dat de maximale vloedsnelheid door FINEL3d wordt onderschat. Het verschil tussen de meetresultaten en de 3D modelresultaten is over het algemeen kleiner dan het verschil tussen de meetresultaten en de 2D modelresultaten, zie ook Figuur 5.1. In paneel vier wordt de maximale vloedstroomsnelheid correct gemodelleerd. Er zit echter een opvallende tweede piek in de getijcurve, die tijdens de stroommetingen niet is waargenomen. In de andere gevallen komt de gemodelleerde curve qua vorm goed overeen met de gemeten getijcurve.

Met betrekking tot de maximale ebstroomsnelheden, is geen eenduidig beeld in de FINEL3d resultaten te herkennen. Per locatie verschilt of het model de stroomsnelheid onderschat, overschat of correct modelleert.

De gemeten dieptegemiddelde stroomsnelheid tijdens maximale vloedstroming langs de op 28 november 2011 gevaren meetraaien is al gepresenteerd in Figuur 5.2. In Figuur 5.11 zijn de dieptegemiddelde modelresultaten langs deze meetraaien weergegeven. In het gehele gebied, behalve in het zuidwestelijke deel, worden de dieptegemiddelde stroomsnelheden door het model overschat. In het zuidwestelijke deel worden de stroomsnelheden relatief goed gemodelleerd. De hier beschreven waarnemingen komen goed overeen met de tijdseries in Figuur 5.10.



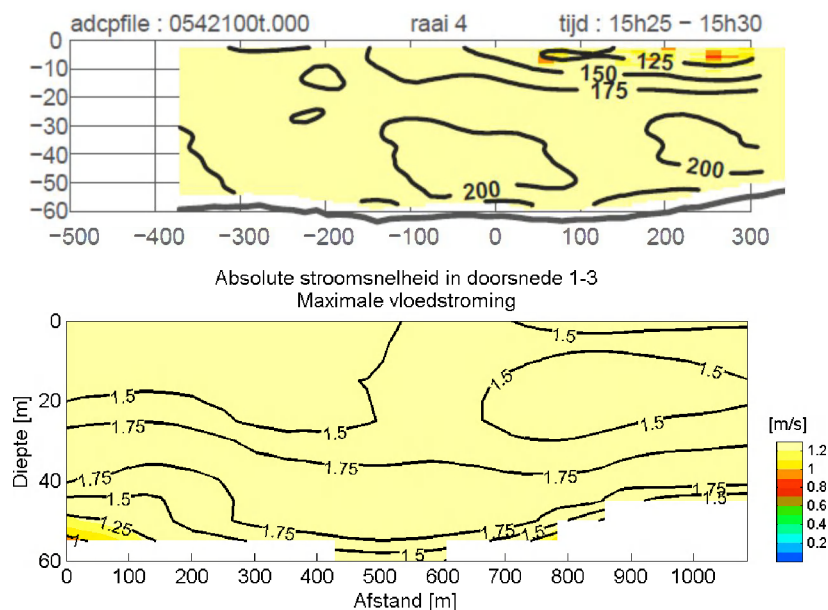
Figuur 5.11: Dieptegemiddelde stroomsnelheid volgens FINEL3d, tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011.

Er is geen beschikking over tijdseries van de stroomrichting, waardoor de gemeten en gemodelleerde dieptegemiddelde stroomrichting alleen met behulp van Figuur 5.2 en Figuur 5.11 vergeleken kunnen worden. In beide figuren wijkt de stroomrichting in het noordoostelijke deel van de Put van Borssele af van de hoofdstroomrichting in de rest van het gebied. In de modelresultaten ontstaat ter plaatse een kleine neer. Deze neer is echter niet in de

Voor de ebstroming, zijn de maximale stroomsnelheden langs de meetraaien weergegeven in Figuur 5.5. De dieptegemiddelde maximale ebstroming berekend met behulp van FINEL3d is gepresenteerd in Figuur 5.12. Ook hier ontstaat in het noordoostelijke deel van de Put van Borssele een neer die in de meetresultaten niet terug te zien is. Verder worden de stroomsnelheden soms overschat of onderschat, maar de afwijking ten opzichte van de meting is beperkt, wat in overeenstemming is met Figuur 5.10 .

Figuur 5.13 laat voor een dwarsraai de maximale vloedstroming zien. Het bovenste paneel is de meting en de onderste is het modelresultaat op hetzelfde moment. Het model reproduceert dat in de onderste diepe lagen de grootste stroomsnelheden voorkomen plaatsvindt (ongeveer 1.75 – 2 m/s). Het blijkt dat in de Put van Borssele een sterke 3D (onder)stroming heerst tijdens vloed die met een 2D model enigszins onderschat wordt.

A26: 1630/U11274/GD/G



Figuur 5.13: Gemeten absolute stroomsnelheid (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde absolute stroomsnelheid (onder) tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011 langs raai 4.

## 5.4 Conclusie

Geconcludeerd kan worden dat FINEL2d redelijk in staat is om de waterstanden en stroomsnelheden te reproduceren. Afwijkingen zijn gevonden tijdens de vloedstroming bij de Put van Borssele waar een sterke onderstroom zorgt voor een afwijking van het logaritmisch snelheidsprofiel. Een 2D model is dan niet afdoende voor het berekenen van de lokale stromingscondities, Het FINEL3d model laat al veel betere resultaten zien en kan deze onderstroom op bijna 60m diepte berekenen.

**6.1 Basis instellingen**

Voor de actualisatie van de morfologie zijn als startpunt de instellingen gebruikt van het bestaande model (Dam, 2006). Als morfologische hindcast periode is gekozen om de jaren 1998 – 2002 door te rekenen. Dit is dezelfde periode als gebruikt is voor de afregeling van het Delft3D model van Kuijper et al (2006) en het geactualiseerde Delft3D model binnen het programma Veiligheid en Toegankelijkheid (Consortium Deltares, IMDC Svašek, Arcadis, 2013b). Bij de actualisatie zijn diverse berekeningen uitgevoerd. Alleen de belangrijkste resultaten worden hier vermeld. Na een aantal iteratieslagen zijn de volgende basis instellingen vastgesteld (hier Run #01 genoemd):

*Tabel 6.1: Basis instellingen morfologie Run #01*

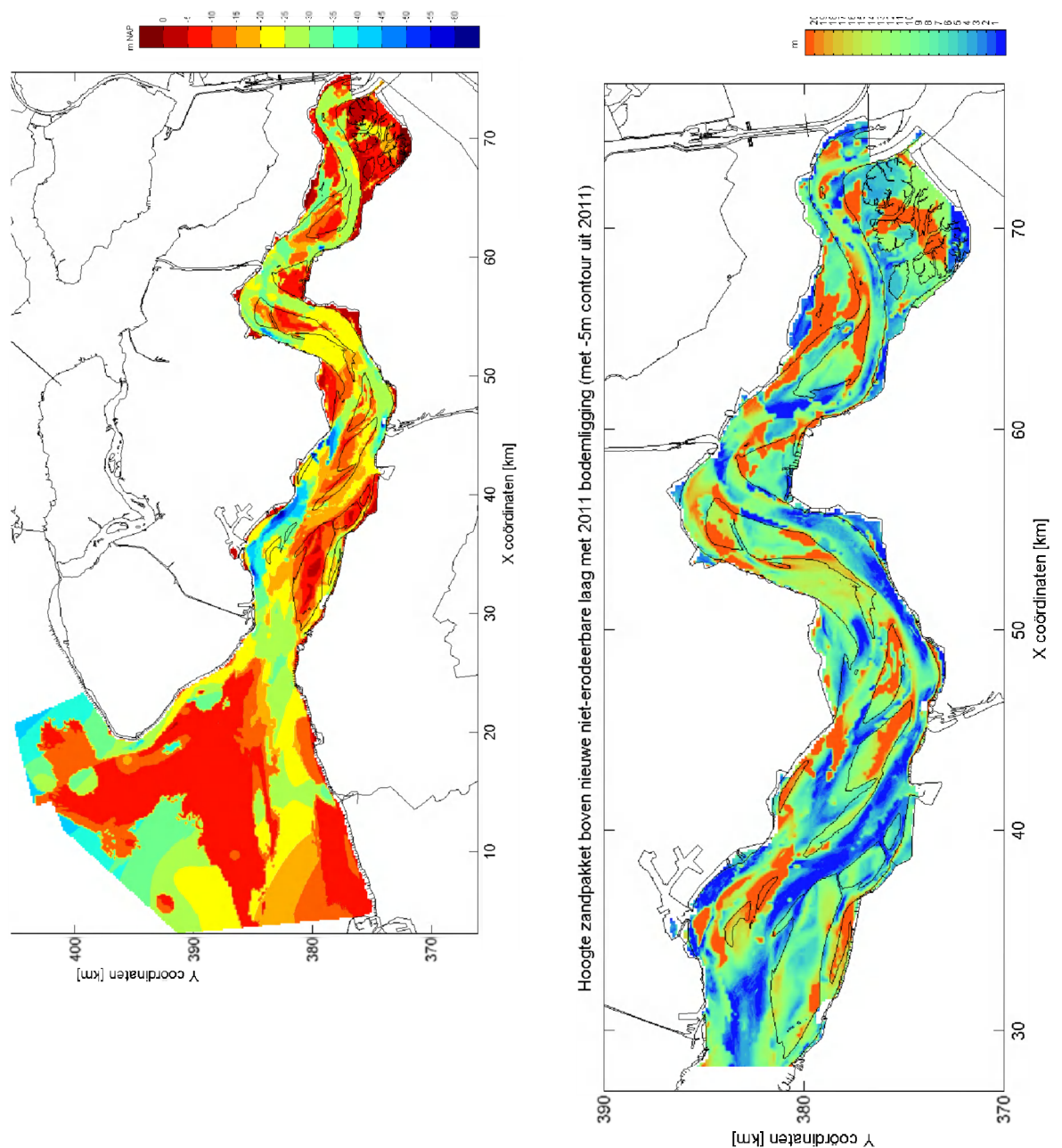
| Parameter                        | Instelling                     |
|----------------------------------|--------------------------------|
| Sediment transport formule       | Engelund Hansen                |
| d <sub>50</sub>                  | 150 µm                         |
| Valsnelheid zand                 | 1.5 cm/s                       |
| Morfologische versnellingsfactor | 24.75                          |
| Parametrisatie spiraalstroming   | Aan                            |
| Inspelen morfologie              | 1 jaar                         |
| Niet erodeerbare laag            | Volgens TNO/RIKZ en Dam (2012) |
| Hydraulische ruwheid             | 1 cm                           |
| Morfologische ruwheid            | 5 cm                           |

Er is een onderscheid tussen de hydraulische en morfologische ruwheid gemaakt; zie de uitleg hiervan in de volgende paragraaf.

De moeilijk of niet-erodeerbare laag voor de Westerschelde is samengesteld door TNO en RIKZ. TNO (Gruijters et al., 2004) heeft op basis van boringen de hoogte van de bovenste harde laag vastgesteld. RIKZ (Van de Male, 2004) heeft vervolgens bepaald waar deze harde laag doorsneden wordt met historische bodems; waar de loding lager lag dan de kartering is deze aangepast op het lodingsniveau. In het kader van dit project heeft een actualisatie van deze niet-erodeerbare laag plaatsgevonden door alle bodemliggingen van 1960 tot en met 2011 te vergelijken met de harde laag en aan te passen waar de bodem lager is geweest (Consortium Deltares, IMDC Svašek, Arcadis, 2012).

Het uiteindelijke resultaat zoals ook toegepast in het FINEL model is te zien in de linker afbeelding van Figuur 6.1. De rechter figuur laat de dikte van het zandpakket zien boven deze harde laag doormiddel van de 2011 bathymetrie. Te zien is dat in veel gebieden in de Westerschelde dit pakket niet erg dik is. Zo ligt de Pas van Terneuzen grotendeels vast in de harde laag. Duidelijk is dat de ligging van de harde laag belangrijk is voor de uitkomsten van het morfologisch model.

Overigens is het onzeker wat de nauwkeurigheid van de harde lagen kaart is. Er zijn aanwijzingen dat deze beperkt is (Consortium Deltares, IMDC Svašek, Arcadis, 2012).



Figuur 6.1: Diepte van 1<sup>e</sup> niet erodeerbare laag (links) en dikte zandlaag boven 1<sup>e</sup> harde laag (rechts)

## 6.2 Optimalisatie van het erosie/sedimentatie patroon

De voornaamste afregelparaameter is de morfologische ruwheid (de hydraulische ruwheid is immers al gekalibreerd). Hiermee wordt de Chézy coefficient bepaald van de Engelund-Hansen formule (zie Appendix A). Deze ruwheidsparameter bepaalt samen met de  $d_{50}$  grotendeels de grootte van de patronen en volumes, hoewel het erosie/sedimentatie patroon (waar sedimentatie en erosie optreedt) niet erg gevoelig is. Door een morfologische ruwheid van 5 cm

in het gehele model te kiezen blijken de grootte van de patronen en de baggervolumes redelijk overeen te komen met metingen.

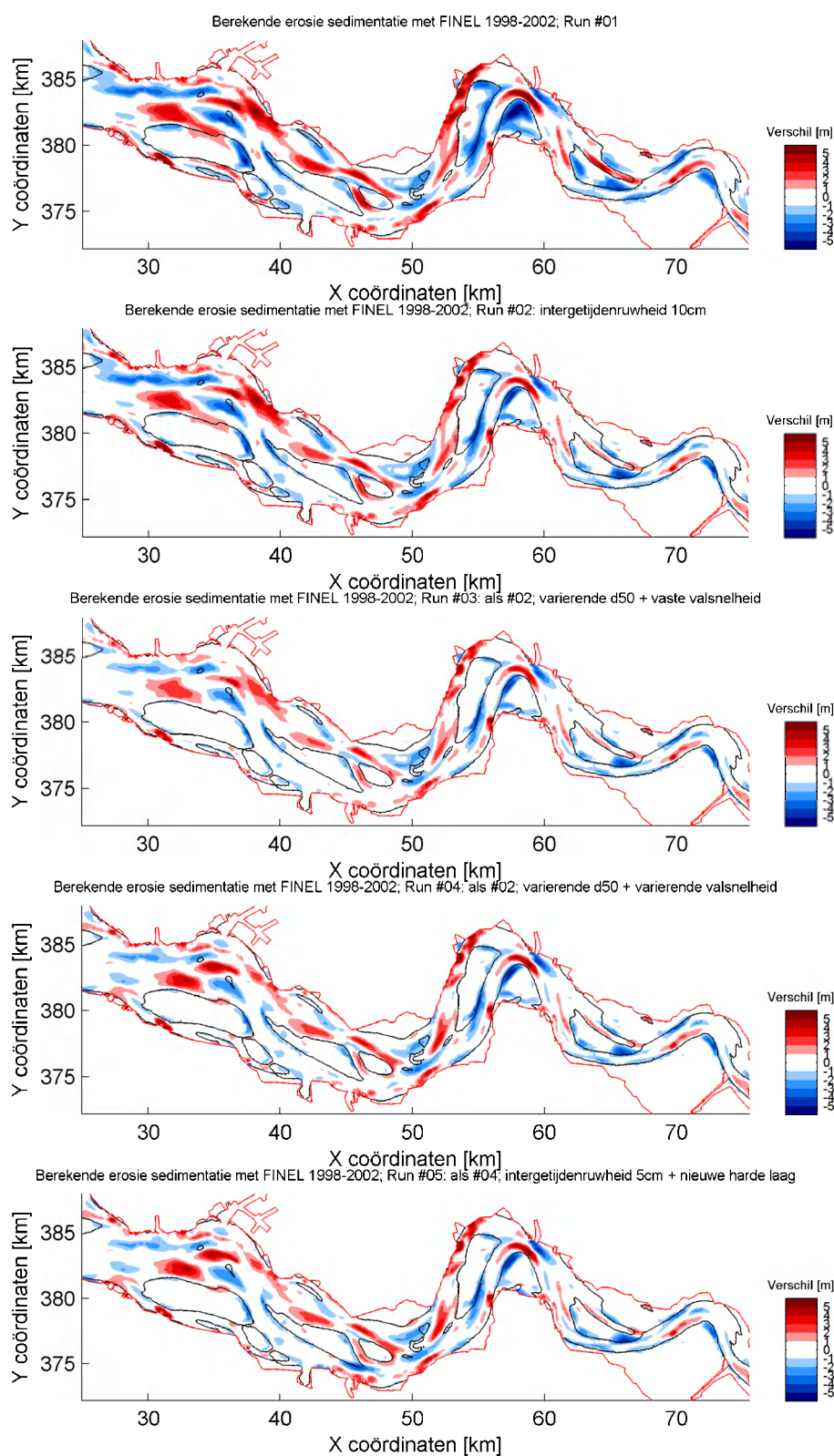
In de bovenste afbeelding van figuur 6.2 is het erosie/sedimentatie patroon van deze berekening te zien. Opvallend is dat het intergetijdengebied sterk erodeert, zie bijvoorbeeld de Plaat van Ossenissee, terwijl de lodingen nauwelijks veranderingen laten zien (de werkelijke bodemveranderingen worden later in dit hoofdstuk beschreven). In de voorgaande studie (Dam, 2006) was dit veel minder het geval. Toen is op basis van de geomorfologische kartering een hydraulisch (en morfologisch) ruwheidsveld gemaakt en toegepast. Dit had bijvoorbeeld bij de Plaat van Ossenissee tot gevolg dat er een grote ruwheid toegepast werd op de westelijke kant van de plaat waar megaribbels voorkomen. Hierdoor vindt er veel minder stroming plaats over de plaat en meer in de geul.

Aangezien het model toegepast moet worden voor een tijdperiode van 100 jaar is het toepassen van een statische ruwheidsfile op basis van de geomorfologische kartering niet een voor de hand liggende optie. De geomorfologie zal immers in de komende decennia waarschijnlijk sterk wijzigen. In de FINEL software is daarom een speciale hydraulische ruwheid ingebouwd voor het intergetijdengebied, welke wordt toegepast bij een hoogte van -2m NAP en hoger. Deze intergetijderuwheid wordt als speciale invoer parameter opgegeven. De hydraulische ruwheid in het model verandert door deze methode continu mee met de bodemveranderingen.

Met deze methode is Run #02 uitgevoerd. De intergetijdenruwheid is op 10 cm gezet. Uit de resultaten (2e afbeelding in Figuur 6.2) blijkt dat het intergetijdengebied nu veel minder erodeert. Deze simpele manier van het schematiseren van de ruwheid in het intergetijdengebied is voor discussie vatbaar, maar lijkt praktisch gezien een goede aanpak voor het verbeteren voor de modelresultaten.

Uit de 2e afbeelding van figuur 6.2 blijkt verder dat er grote veranderingen in de monding plaatsvinden (tussen Vlissingen – Breskens). In werkelijkheid zijn deze veranderingen veel kleiner, zie linker afbeelding van Figuur 6.4. Het is onduidelijk hoe dit komt. Gedacht werd dat golven een rol zouden kunnen spelen bij de morfologische ontwikkeling van de monding, echter in validatiecase 2 (hoofdstuk 8) waar een hindcast van 1860-1970 uitgevoerd wordt blijkt dat in deze periode de morfologie op deze plek goed voorspeld wordt. Bij deze simulatie zijn ook geen golven meegenomen en dus kan dit niet de enige verklaring zijn.





Figuur 6.2: Uitkomsten van Runs #01 – 05.

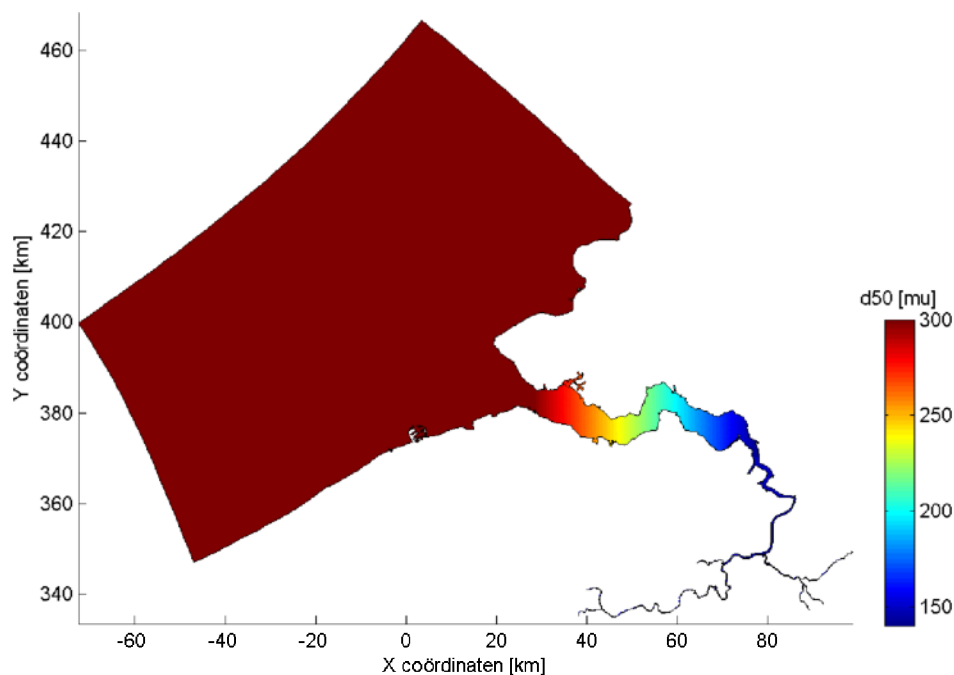


Een verdere optimalisatie is verkregen door het toepassen van een ruimtelijk  $d_{50}$  veld om de natuurlijke afname van de korrelgrootte in oostelijke richting in de Westerschelde weer te geven.. Het toegepaste ruimtelijke veld is te zien in Figuur 6.3. In de monding wordt een  $d_{50}$  toegepast van 300  $\mu\text{m}$ . De korrelgrootte neemt af tot 150  $\mu\text{m}$  bij de grens tussen Nederland en Vlaanderen en in Vlaanderen wordt een constante  $d_{50}$  van 150  $\mu\text{m}$  gehanteerd. Op deze manier wordt nog steeds met slechts 1 fractie gerekend per locatie, maar wordt wel gecompenseerd voor de ruimtelijke verdeling van de korrelgrootte. In het model wordt het sediment dat naar het oosten wordt verplaatst in feite fijner en naar het westen toe grover. Er is geen onderscheid gemaakt tussen geulen en platen.

Met dit ruimtelijk  $d_{50}$  veld zijn twee runs gedaan: Run #03 en Run #04. Bij run #03 is de valsnelheid van het sediment constant gehouden op de basis instelling van 1.5 cm/s. Bij Run #04 en Run #5 is de valsnelheid van het sediment afhankelijk gemaakt van de  $d_{50}$  en varieert daardoor ook ruimtelijk: een relatief grote valsnelheid in de monding en een relatief kleine valsnelheid in het oosten. In de loop van het project is de niet-erodeerbare laag aangepast, zie Consortium Deltares, IMDC Svašek, Arcadis (2012). Deze is gebruikt voor run #05 , tezamen met een intergetijderuwheid van 5 cm. Voor dit laatste is gekozen omdat gebleken is dat dit vrijwel geen verschil maakt met de run voor 10cm en 5 cm beter aansluit bij de globale ruwheid van 1 cm. De verschillen tussen de 5 runs zijn gespecificeerd in onderstaande tabel:

Tabel 6.2: Run overzicht

| Run/ parameter | Hydraulische ruwheid              | $d_{50}$          | Valsnelheid sediment | Niet-erodeerbare laag |
|----------------|-----------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| #01            | 1 cm                              | 150 $\mu\text{m}$ | 1.5 cm/s             | TNO/RIKZ              |
| #02            | 1 cm;<br>intergetijdengebied 10cm | 150 $\mu\text{m}$ | 1.5 cm/s             | TNO/RIKZ              |
| #03            | 1 cm;<br>intergetijdengebied 10cm | Variabel          | 1.5 cm/s             | TNO/RIKZ              |
| #04            | 1 cm;<br>intergetijdengebied 10cm | Variabel          | Variabel             | TNO/RIKZ              |
| #05            | 1 cm;<br>intergetijdengebied 5cm  | Variabel          | Variabel             | Consortium (2012)     |

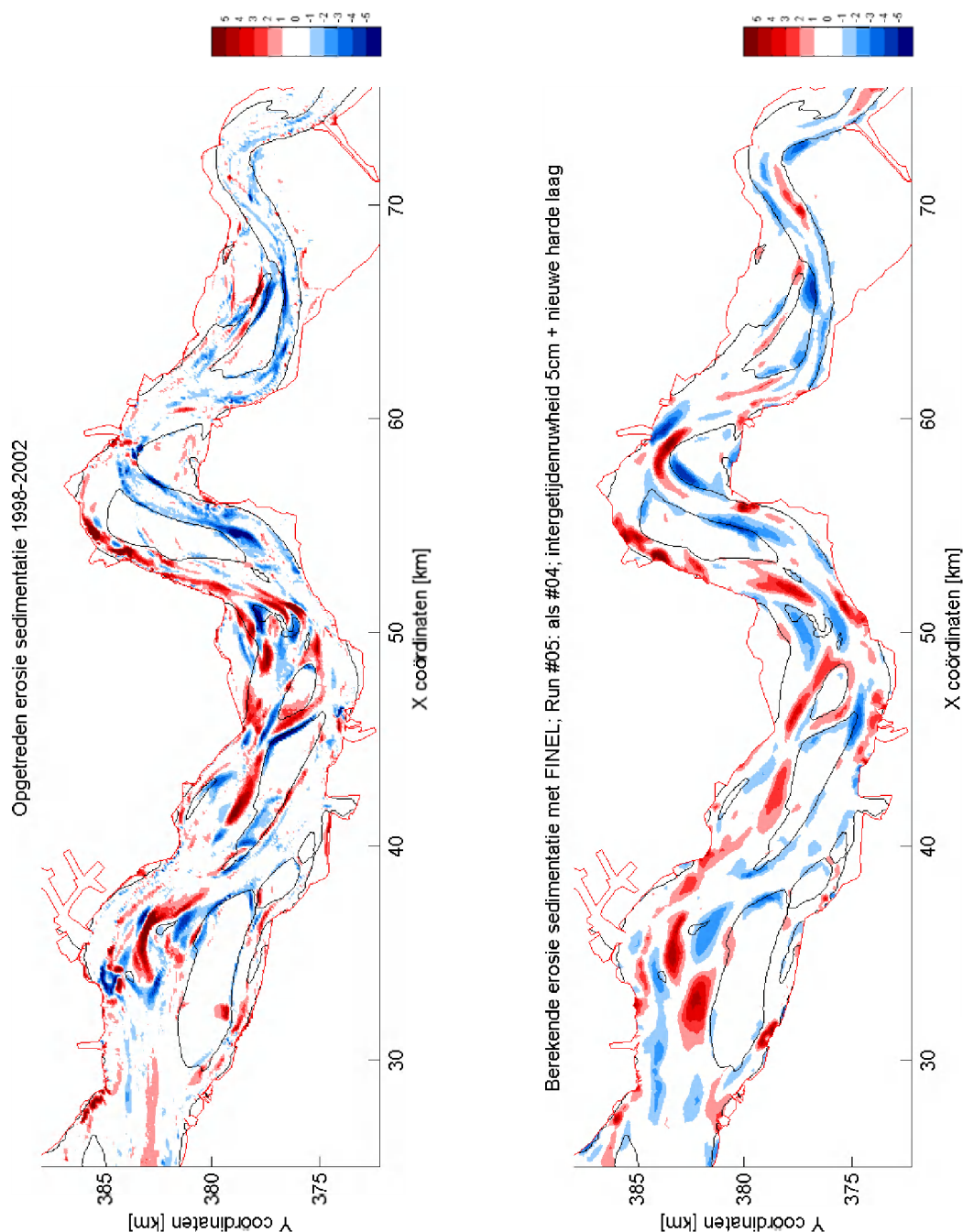


Figuur 6.3: Toegepaste ruimtelijke  $d_{50}$

In de afbeeldingen 3 en 4 van Figuur 6.2 is te zien welk effect het ruimtelijk  $d_{50}$  veld en de variabele valsnelheid heeft. Vooral in de monding van de Westerschelde worden de resultaten beter: de eerdere sterke erosie en sedimentatie is grotendeels verdwenen door het toepassen van een grotere (realistische) korrelgrootte. Ook de sterke sedimentatie in de Put bij Borssele wordt verminderd. In het oosten verandert er vrijwel niets; dit is logisch want hier wordt een constante  $d_{50}$  van 150  $\mu\text{m}$  gehanteerd. Run #04 voorspelt de gemeten baggervolumes iets beter dan run #03 (niet getoond). Verder lijkt het patroon bij Run #04 op details net iets beter op de werkelijkheid; gebieden die bijvoorbeeld net iets beter gesimuleerd worden zijn de stortgebieden bij de Spijkerplaat, de Everingen en de Put van Borssele. Uiteindelijk is Run#05 als definitieve calibratie run gekozen omdat deze de werkelijkheid het dichtst benaderd. De resultaten van Run #05 verschillen nauwelijks van Run #04, maar er heeft een update van de harde lagen file plaatsgevonden en de ruwheid van het intergetijdengebied is naar beneden bijgesteld.

Figuur 6.4 toont het opgetreden erosie/sedimentatie patroon (links) en het berekende patroon (rechts) van de definitieve calibratie run nogmaals (run #05). Over het algemeen geldt dat de intensiteit van de kleuren van beide plots in dezelfde orde grootte ligt, dit geeft aan dat de gekozen morfologische ruwheid van 5 cm in de goede range ligt (een bevestiging hiervan blijkt uit de baggervolumes, zie ook de beschrijving hierna). Een aantal patronen worden goed beschreven door het model. Het Middelgat toont zowel in het model als in werkelijkheid een sterke sedimentatie en het tegenover gelegen Gat van Ossensisse vertoont juist een erosie. De kortsluiting die de Pas van Terneuzen maakt richting de Spijkerplaat is goed te zien in zowel de metingen als het model. Ook het stortgebied op de Spijkerplaat is terug te zien in het model en in de metingen en in de Everingen is het stortgebied net ten noorden van de Middelpaalt terug te zien. Het opschuiven van de kortsluitgeul van de Zuid-Everingen is goed te zien. In het oosten lijkt er minder morfologische activiteit te zijn in zowel meting als model (vergeleken met het westen). De meest opvallende patronen die niet goed beschreven worden door het model zijn de diepe delen in de Westerschelde, met name bij de Put van Hansweert (en in mindere mate in

de Put van Borssele). Het model voorspelt een grote sedimentatie in deze putten omdat de 2d stroming hier vertraagt door de grote diepte (zie ook het vorige hoofdstuk). De Put van Hansweert schuift zelfs op richting de Schaar van Waarde in het model terwijl dit in werkelijkheid niet gebeurt. Ook de grote sedimentatie in het model ten westen van de Schaar van Spijkerplaat en ten noorden van de Hoge Platen komt niet overeen met de werkelijkheid. Geconcludeerd kan worden dat het model voor een groot aantal gebieden de globale morfologische ontwikkelingen kan berekenen maar voor een aantal gebieden zoals de diepe putten wordt de ontwikkeling minder goed voorspeld.



Figuur 6.4: Opgetreden en berekende erosie/sedimentatie 1998/2002 met 5m dieptecontour definitieve calibratie run

### 6.3 Baggeren en storten

In de Westerschelde vindt voortdurend onderhoudsbaggerwerk plaats van de vaargeul. In het FINEL model is deze vaargeul gedefinieerd door de lijn tussen de boeien toe te voegen. Het model houdt zelf bij waar gebaggerd moet worden in de vaargeul als een bepaalde diepte overschreden wordt. Het model hanteert de volgende dieptes voor de verschillende delen van de vaargeul (uit Dam, 2006):

Tabel 6.3: gehanteerde dieptes voor de vaargeul

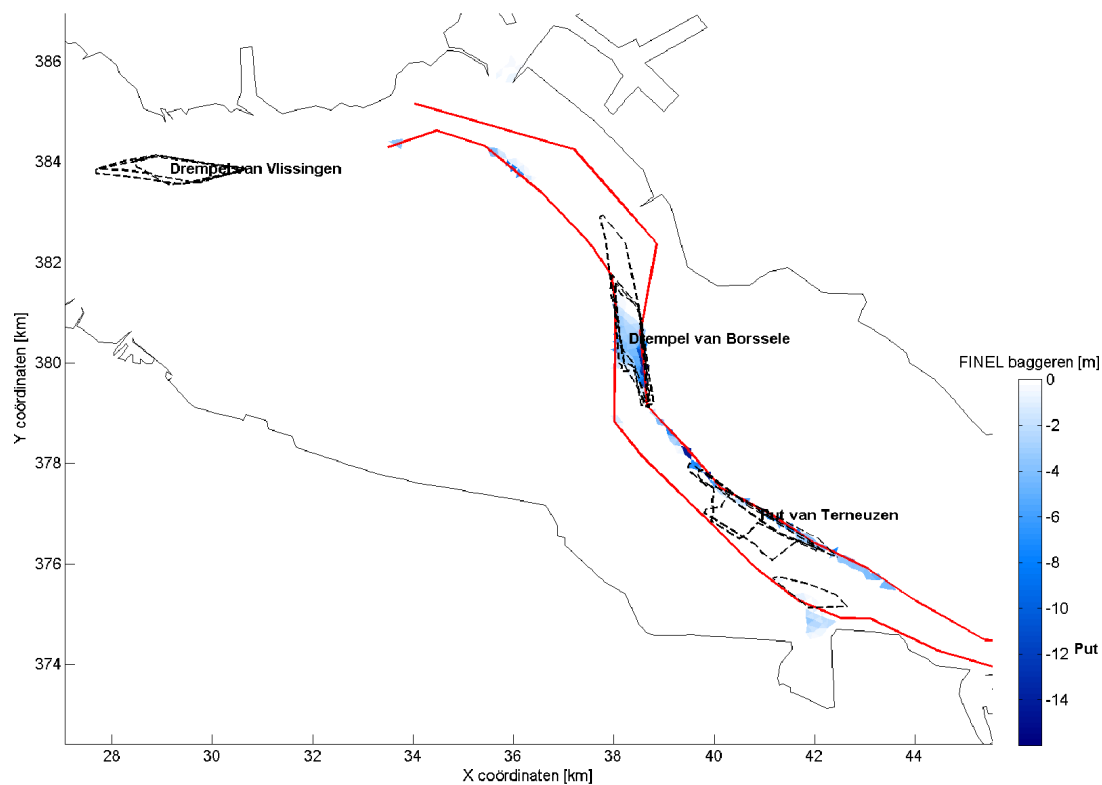
| Index:                      | 14                          | 13                  | 8                         | 4                          | 3               | 12                 | 10                    | 11                  | 9                          | 7                            | 6                         | 5                           | 2            |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------|
| Bagger-<br>gebied /<br>jaar | Drempel<br>Vliis-<br>singen | Drempel<br>Borssele | Drempel<br>Hans-<br>weert | Drempel<br>Valk-<br>enisse | Drempel<br>Bath | Put Ter-<br>neuzen | Platen Os-<br>senisse | Drempel<br>Baarland | Overloop<br>Hans-<br>weert | Plaat van<br>Wals-<br>oorden | Platen<br>Valk-<br>enisse | Overloop<br>Valk-<br>enisse | Ballastplaat |
| 1998-2001                   | -16.8                       | -16.3               | -15.9                     | -16                        | -16             | -16.3              | -15.9                 |                     | -15.9                      | -15.9                        | -16                       | -16                         | -            |

Het zand dat gebaggerd wordt uit de vaargeul wordt volgens een verdeelsleutel gestort in de stortgebieden, zie tabel 6.4. Deze verdeelsleutel is bepaald aan de hand van historische stortgegevens en afgeleid in Kuijper et al, 2006. Deze verdeelsleutel is bekend onder de naam "oost-west strategie" omdat in de huidige situatie zand dat gebaggerd wordt in het oosten wordt gestort in het westen.

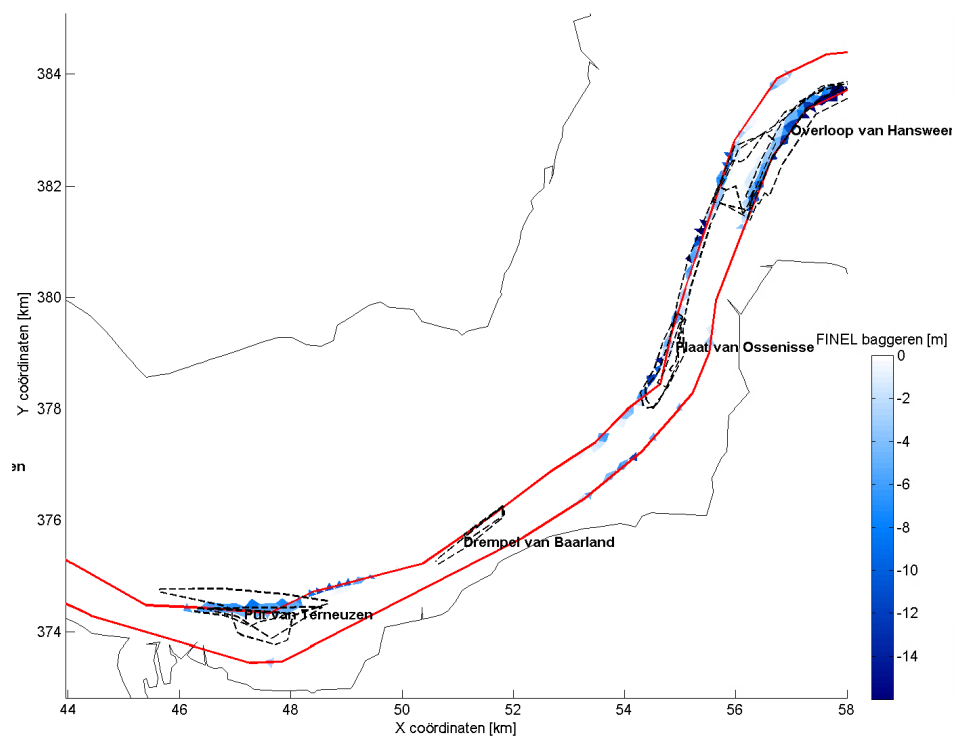
Tabel 6.4: Verdeling baggeren/storten

|                          | Index baggergebied:          | 14                          | 13                  | 12                        | 11                  | 9                          | 8                         | 10                    | 7                            | 6                         | 4                          | 3                   | 5                          |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|
| Index<br>stort<br>gebied | Baggergebied/<br>Stortgebied | Drempel<br>Vliis-<br>singen | Drempel<br>Borssele | Put van<br>Ter-<br>neuzen | Drempel<br>Baarland | Overloop<br>Hans-<br>weert | Drempel<br>Hans-<br>weert | Platen Os-<br>senisse | Plaat van<br>Walsoor-<br>den | Platen<br>Valk-<br>enisse | Drempel<br>Valk-<br>enisse | Drempel<br>van Bath | Overloop<br>Valkeniss<br>e |
| 12                       | Schaar van Waarde EB/VL      |                             |                     |                           |                     | 3                          | 2                         |                       | 26                           | 4                         | 7                          | 19                  | 8                          |
| 14                       | Platen van Ossenisse         |                             |                     |                           |                     | 6                          | 1                         |                       | 11                           |                           | 1                          | 5                   | 0                          |
| 16                       | Gat van Ossenisse EB         |                             |                     |                           |                     | 9                          | 8                         |                       | 6                            | 10                        | 22                         | 14                  | 12                         |
| 17                       | Gat van Ossenisse VL         |                             |                     |                           |                     | 6                          | 6                         |                       | 9                            | 4                         | 17                         | 11                  | 8                          |
| 19                       | Ebschaar Everingen           |                             |                     |                           |                     | 1                          | 7                         | 17                    |                              |                           | 5                          | 4                   | 3                          |
| 20                       | Vloedsch. Everingen EB       |                             | 18                  | 10                        |                     | 3                          | 5                         | 5                     |                              | 1                         | 1                          |                     | 1                          |
| 21                       | Vloedsch. Everingen VL       | 9                           | 39                  | 13                        |                     | 9                          | 11                        | 9                     |                              | 26                        | 2                          | 1                   | 6                          |
| 22                       | Sch. Vd spijkerplaat EB/VL   | 40                          | 39                  | 50                        | 73                  | 26                         | 14                        | 33                    | 11                           | 24                        | 2                          | 6                   | 17                         |
| 24                       | Biezelingse ham EB/VL        |                             | 2                   |                           |                     | 19                         | 23                        | 13                    | 7                            |                           | 30                         | 30                  | 28                         |
| 25                       | Ellewoutsdijk EB/VL          |                             | 2                   | 27                        | 27                  | 18                         | 23                        | 23                    | 30                           | 31                        | 10                         | 10                  | 17                         |
| 26                       | Kust Z Vlaanderen EB/VL      | 48                          |                     |                           |                     |                            |                           |                       |                              |                           |                            |                     |                            |
| 27                       | Kust Vlissingen EB/VL        | 3                           |                     |                           |                     |                            |                           |                       |                              |                           |                            |                     |                            |
| S104                     | Schaar v Ouden Doel          |                             |                     |                           |                     |                            |                           |                       |                              |                           | 3                          |                     |                            |
|                          | Totaal:                      | 100                         | 100                 | 100                       | 100                 | 100                        | 100                       | 100                   | 100                          | 100                       | 100                        | 100                 | 100                        |

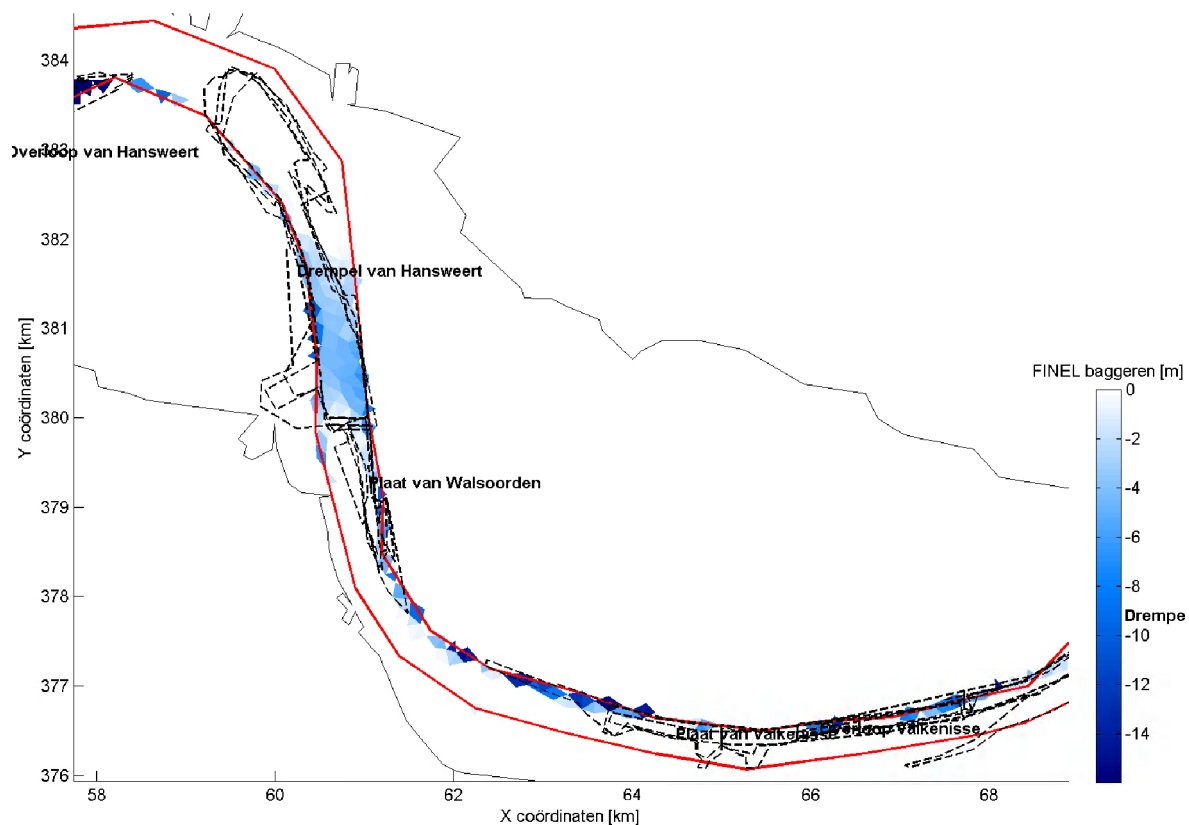
In de figuren 6.5 t/m 6.8 zijn de in Run #5 voorspelde baggerlocaties van het model aangegeven door middel van kleur en de werkelijke polygonen van de baggervakken van de jaren 1998 – 2001 zijn aangegeven met zwarte stippellijnen. De kleurintensiteit geeft de hoeveelheid baggerwerk aan per roostercel in meters over de simulatieperiode; een witte kleur in de figuren geeft aan dat er niet gebaggerd hoeft te worden volgens het model (binnen de boeienlijn). De rode lijnen zijn de boeienlijnen die de vaargeul markeren. De namen refereren aan de namen van de werkelijke baggervakken. Uit de figuren blijkt dat de gebieden waar het model voorspelt dat gebaggerd moet worden goed overeenkomt met de locaties van de belangrijkste werkelijke baggervakken. De locatie van de Drempel van Borssele, De Overloop van Hansweert, de Drempel van Valkenisse en de Drempel van Bath worden zeer goed door het model berekend. De berekende baggerlocaties volgen hier vrijwel exact de polygonen van de baggervakken. Het baggeren op de locatie de Drempel van Hansweert wordt door het model redelijk goed voorspeld. Volgens het model is het baggeren geconcentreerd in het zuidelijk deel van de polygoon, terwijl het noordelijk deel niet onderhouden zou hoeven te worden. De ruimtelijke verdeling van het baggerwerk binnen de baggerpolygoon is echter niet bekend en dit valt dus (op dit moment) niet te verifiëren. Opmerkelijk is dat in Figuur 6.4 aanzanding te zien is rond het noordelijke deel van de Drempel van Hansweert. Deze aanzanding vindt echter net buiten de vaargeul plaats op de rand van Plaat van Ossensisse. Ook vindt er sedimentatie plaats in de Put van Hansweert maar de diepte is nog zodanig dat er niet gebaggerd hoeft te worden. De baggervakken in het Zuidergat (de Plaat van Walsoorden, de Plaat van Valkenisse en de Overloop van Valkenisse) liggen op de noordelijke grens van de vaargeul en zijn relatief smalle vakken. Ondanks de beperkte resolutie van het model lukt het redelijk goed om deze smalle baggerpolygonen op de rand van de vaargeul te voorspellen. Hetzelfde geldt voor de baggervakken Put van Terneuzen en Plaat van Ossensisse. Overigens liggen sommige baggerpolygonen deels buiten de boeienlijn. In de gebruikte methode voorspelt het model echter alleen baggerlocaties binnen de boeienlijn.



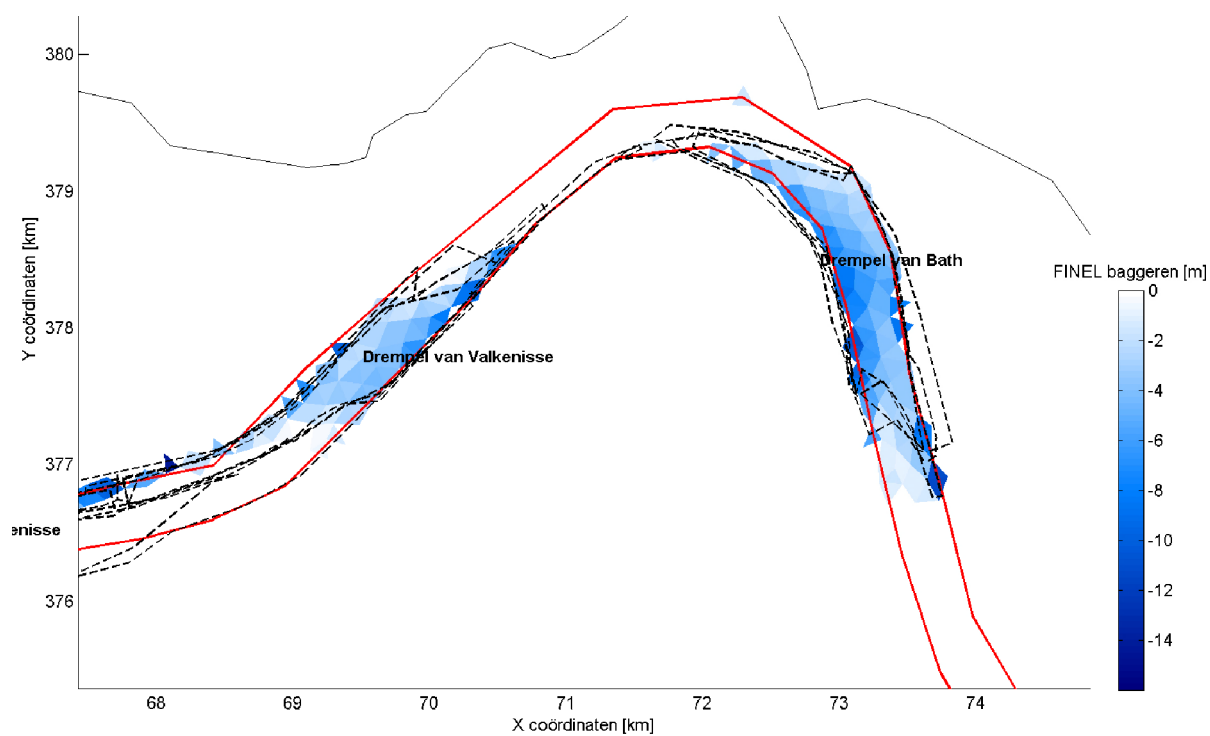
Figuur 6.5: Locatie waar gebaggerd wordt in FINEL model + werkelijke baggercontouren ( - - ); rood = boeienlijn



Figuur 6.6: Locatie waar gebaggerd wordt in FINEL model + werkelijke baggercontouren ( - - ); rood = boeienlijn



Figuur 6.7: Locatie waar gebaggerd wordt in FINEL model + werkelijke baggercontouren ( - - ); rood = boeienlijn

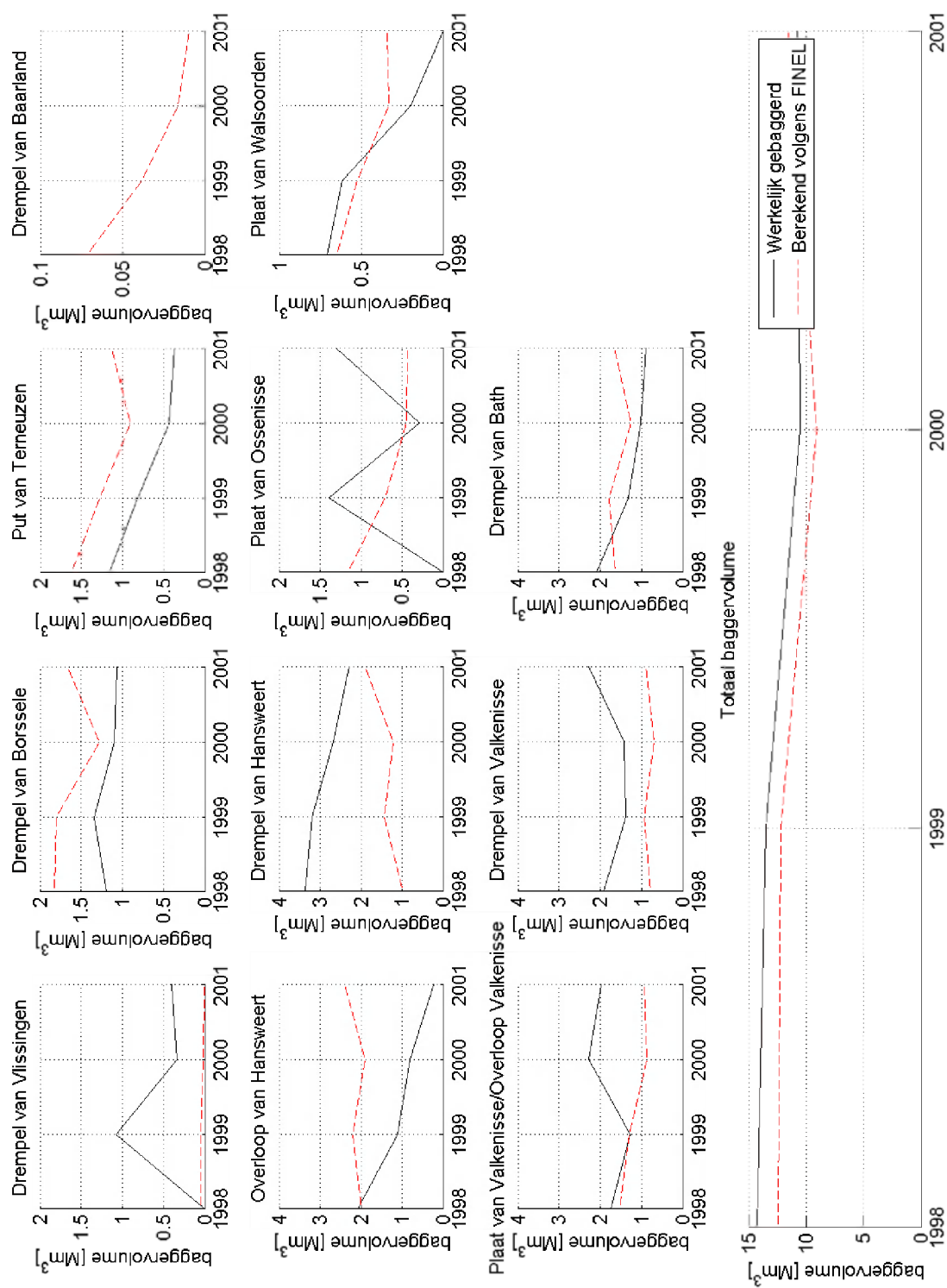


Figuur 6.8: Locatie waar gebaggerd wordt in FINEL model + werkelijke baggercontouren ( - - ); rood = boeienlijn



Per baggergebied is gekeken wat de werkelijke en berekende volumes zijn (figuur 6.9). Op het eerste gezicht liggen de volumes in dezelfde orde grootte; orde 10 -15 Mm<sup>3</sup> per jaar. Het model heeft overigens 1 jaar nodig om in te spelen, het baggervolume van het 1e jaar bedraagt 25 Mm<sup>3</sup>. De volumes van de westelijke baggergebieden werden over het algemeen overschat, terwijl de volumes van oostelijke baggergebieden onderschat werden. Dit wordt uiteindelijk enigszins rechtgetrokken in Run #5 door te rekenen met een ruimtelijk d<sub>50</sub> veld. Het totale baggervolume is iets te lager dan in werkelijkheid. De licht dalende trend van de totale baggerhoeveelheid wordt door het model gevolgd. De oorzaak voor de dalende trend is niet duidelijk. Over het algemeen kan gezegd worden dat FINEL zeer goed in staat is om de baggerlocaties te identificeren. De grootte van de berekende baggervolumes liggen in de buurt van de werkelijke volumes. In figuur 6.9 is te zien is dat de voorspelde te baggeren hoeveelheden in het gebied van de Drempel van Baarland vrijwel 0 is. Dit is in overeenstemming met de werkelijkheid omdat de Drempel van Baarland een oude drempel is welke in de huidige situatie niet meer aanwezig is. Deze locatie komt terug in het volgend hoofdstuk waar een langere hindcast uitgevoerd is.

Naast baggeren vindt er in werkelijkheid ook zandwinning plaats in de Westerschelde en Zeeschelde. In Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013a) is een probleemanalyse gegeven. In FINEL2d wordt zandwinning in het model opgelegd door de winpolygonen op te geven met het per jaar gewonnen volume in per polygoon. De winning wordt evenredig over elke polygonen verdeeld en de zandwinning wordt over een heel jaar verdeeld. Voor een overzicht van de zandwinggegevens en locaties wordt verwezen naar Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013a).



Figuur 6.9: Werkelijke en berekende baggervolumes

## 6.4 Import/export van de Westerschelde

Een andere belangrijke parameter is de zand import/export van de Westerschelde. Volgens Nederbragt & Liek (2004) en Haecon (2006) was er meestal sprake van import van zand (eigenlijk 'sediment') in de Westerschelde, maar niet in de periode 1998-2002, toen sprake was van een netto export. Het model berekent voor de periode 1998-2002 een export van ongeveer  $1 \text{ Mm}^3$  per jaar, maar geeft ook export voor andere perioden, waar de sedimentbalans import geeft.

Er zijn diverse berekeningen gedraaid waarbij getracht is de zand export te veranderen naar import, maar geen enkele realistische modelinstelling liet een wisseling zien tussen export en import. In een later stadium van het project is gevonden dat het waarschijnlijk is dat er een export van zand plaatsvindt door een grote import van slib, zodat er netto een import van sediment (zand + slib) plaatsvindt (Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis, 2013). Verder is met morfostatische berekeningen met Delft3d ook gevonden dat vanaf de jaren '70 deze export van zand al plaatsvond (Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis, 2013).

## 6.5 Kwaliteit van de resultaten

Om de berekende resultaten te kunnen duiden wordt per macrocel in de Westerschelde het berekende bodemverschil geplot tegen het gemeten bodemverschil van de periode 1998-2002. Het gemeten bodemverschil wordt hiertoe naar het modelgrid geïnterpoleerd. Figuur 5.10 toont de uitkomsten van elke macrocel (cel 1 is de monding, cel 7 is bij de Belgische grens) en van de gehele Westerschelde. Door de puntenwolk is een lineaire lijn gefit en een daarbij behorende regressiecoëfficiënt  $R^2$  bepaald. Een  $R^2$  van 1 is een perfecte fit tussen de punten, een  $R^2$  van 0 laat geen verband zien tussen de punten.

Om de resultaten verder te duiden is daarnaast ook een Brier-Skill score per macrocel en de gehele Westerschelde bepaald. Deze is als 'BSS' in de titels van de subfiguren getoond. Voor deze methode moet een foutenmarge van de bodemverschillen worden opgegeven. Hier is gekozen een fout van 0,5m, gebaseerd op meetfouten en de interpolatiefouten van het GIS grid naar het FINEL grid. De volgende klassering wordt gehanteerd:

|            |             |
|------------|-------------|
| Excellent  | : 1.0 - 0.8 |
| Goed       | : 0.8 - 0.6 |
| Acceptabel | : 0.6 - 0.3 |
| Mager      | : 0.3 - 0.0 |
| Slecht     | : < 0       |

Het is bekend dat een BSS waarde zeer gevoelig is voor kleine ruimtelijke verschillen tussen model en meting. Een patroon kan op het oog goed zijn terwijl de BSS score negatief kan zijn, hierdoor moet niet al te veel waarde aan een BSS score gehecht worden maar het kan wel een goed beeld van de relatieve kwaliteit van de resultaten van de diverse macrocellen geven.

Figuur 5.10 laat zien dat de puntenwolken voor de diverse macrocellen op het eerste gezicht een redelijk verband vertonen. De bodemverschillen van met name Macrocel 2 (Vaarwater langs Hoofdplaat) en Macrocel 4 (Gat van Ossenissee/Middelgat) worden goed door het model berekend. Deze macrocellen hebben dan ook de hoogste  $R^2$  en BSS. Macrocellen 1 (mondingsgebied), 3 (Pas van Terneuzen/Everingen) en 7 (Vaarwater bij Bath/Appelzak) worden redelijk door het model berekend. Er is een verband te zien tussen de punten en dat is terug te zien in de  $R^2$  en de positieve BSS. Macrocellen 5 en 6 worden vrij slecht door het model

berekend. Het model laat veel grotere veranderingen zien dan de meting (horizontale spreiding groter dan verticale) ende BSS waarden zijn hier negatief.

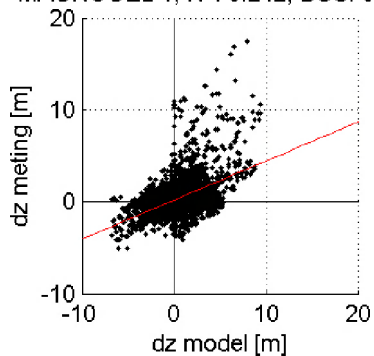
In figuur 6.10 rechtsonder staan alle roosterpunten van de Westerschelde. Te zien is hoe er een verband zichtbaar is met een overall  $R^2$  van 0.266 en een Brier-skill score van 0.192. Een korte rekensom leert dat 66.4% van de punten zich in het juiste kwadrant bevindt, dat wil zeggen dat erosie in het model ook een erosie in werkelijkheid is en omgekeerd. Het gaat hierbij om de kwadranten linksonder of rechtsboven. Bovendien valt op dat de punten die zich in het verkeerde kwadrant bevinden een relatief kleine fout hebben vergeleken met de spreiding van de puntenwolk.

In Tabel 6.5 staan alle indicatoren nog eens samengevat per macrocel. In de tweede kolom is het percentage punten dat zich in het juiste kwadrant bevindt per macrocel getoond. Opvallend is dat voor alle macrocellen het percentage rond de 65% ligt, zowel voor de goede als slecht presterende macrocellen.

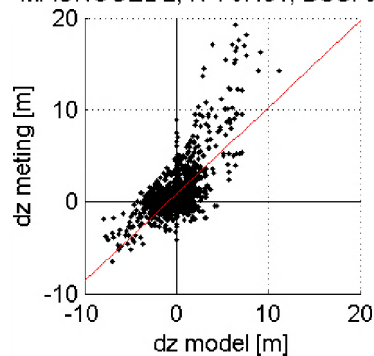
*Tabel 6.5: Indicatoren voor de reproductienauwkeurigheid*

|                      | % punten goed | $R^2$ | BSS   |
|----------------------|---------------|-------|-------|
| Macrocel 1           | 65.2 %        | 0.24  | 0.18  |
| Macrocel 2           | 62.4 %        | 0.45  | 0.56  |
| Macrocel 3           | 68.4 %        | 0.30  | 0.26  |
| Macrocel 4           | 68.7 %        | 0.43  | 0.40  |
| Macrocel 5           | 65.9 %        | 0.19  | -0.16 |
| Macrocel 6           | 65.1 %        | 0.05  | -2.0  |
| Macrocel 7           | 68.6 %        | 0.26  | 0.29  |
| Gehele Westerschelde | 66.4 %        | 0.27  | 0.19  |

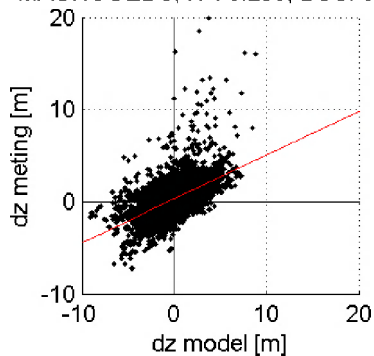
MACROCEL 1;  $R^2$ : 0.242; BSS: 0.178



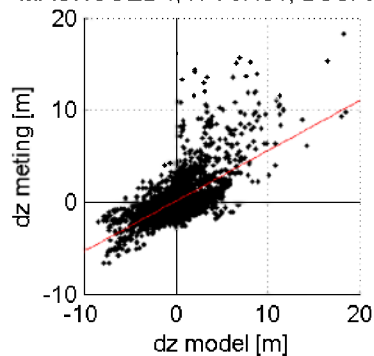
MACROCEL 2;  $R^2$ : 0.451; BSS: 0.564



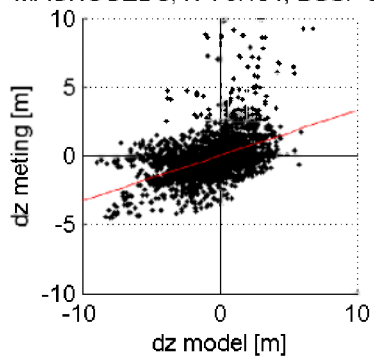
MACROCEL 3;  $R^2$ : 0.298; BSS: 0.259



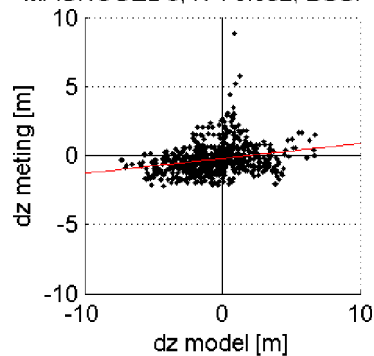
MACROCEL 4;  $R^2$ : 0.431; BSS: 0.401



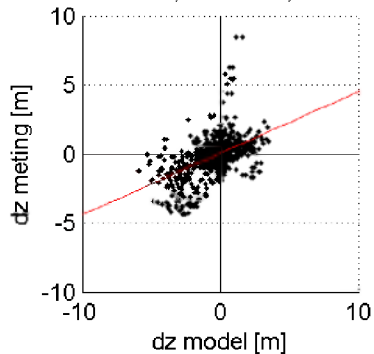
MACROCEL 5;  $R^2$ : 0.194; BSS: -0.164



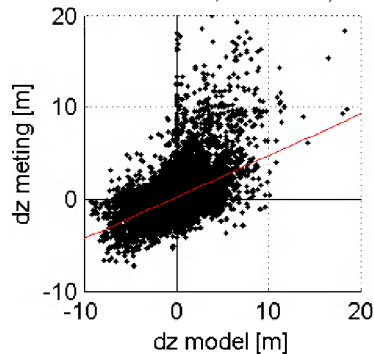
MACROCEL 6;  $R^2$ : 0.052; BSS: -2.01



MACROCEL 7;  $R^2$ : 0.263; BSS: 0.279



Gehele Westerschelde;  $R^2$ : 0.266; BSS: 0.192



Figuur 6.10: Per roosterpunt de bodemverandering dz van model uitgezet tegen bodemverandering van meting voor periode 1998-2002. Macrocel 1 is monding; macrocel 7 is bij de Nederlands/Vlaamse grens

## 6.6 Vergelijk met Delft3D uitkomsten

In Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013b) is het model Delft3D ingezet voor dezelfde simulatie periode. Voor details over deze Delft3D berekening wordt verwezen naar dat rapport. In figuur 6.11 zijn de gemeten en de berekende bodemontwikkelingen van beide modellen getoond.

Op basis van figuur 6.11 kan geconcludeerd worden dat beide modellen ongeveer even goed presteren. De voorspelde patronen zijn min of meer vergelijkbaar en de verschillen zijn vooral te vinden in de kwantiteit van de voorspelde erosie/sedimentatie. In bepaalde gebieden reproduceert FINEL2d beter de werkelijkheid en in andere gebieden Delft3d.

Tabel 6.6 toont de werkelijke en berekende baggervolumes van beide modellen. Delft3d berekent te hoge baggervolumes. FINEL2d is vooral de eerste jaren iets aan de te lage kant, maar ligt dicht bij de werkelijke baggervolumes. Beide modellen tonen een afnemend volume in de tijd, overeenkomstig de werkelijke volumes.

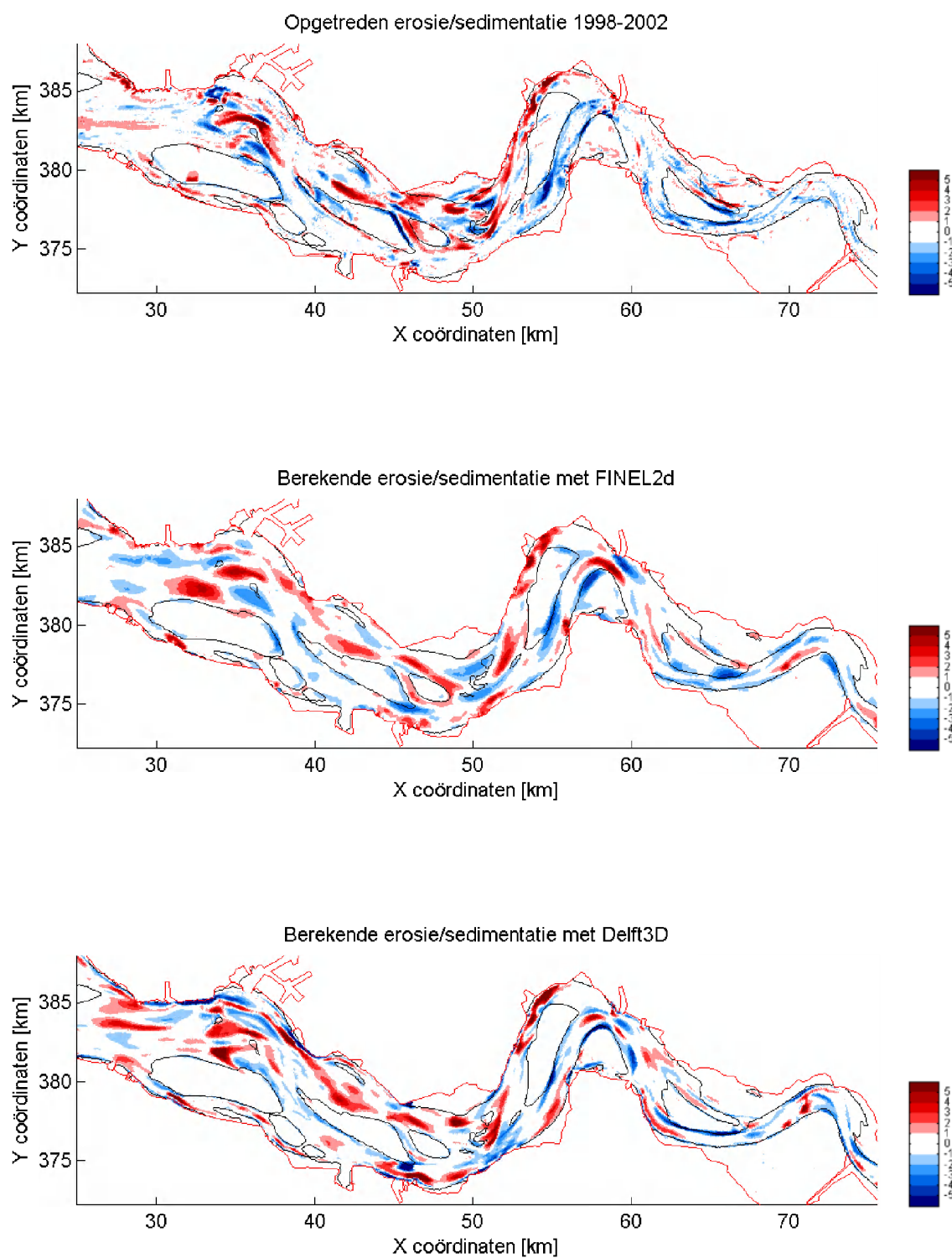
Tabel 6.6: Werkelijke en berekende totale baggervolumes (beunvolume)

| jaar | Werkelijk            | FINEL2d              | Delft3D              |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1998 | 14.2 Mm <sup>3</sup> | 12.4 Mm <sup>3</sup> | 18.9 Mm <sup>3</sup> |
| 1999 | 13.5 Mm <sup>3</sup> | 12.2 Mm <sup>3</sup> | 17.6 Mm <sup>3</sup> |
| 2000 | 10.5 Mm <sup>3</sup> | 9.0 Mm <sup>3</sup>  | 16.8 Mm <sup>3</sup> |
| 2001 | 10.8 Mm <sup>3</sup> | 11.5 Mm <sup>3</sup> | 16.2 Mm <sup>3</sup> |

## 6.7 Conclusie

Geconcludeerd kan worden dat FINEL2d in staat is om de meeste grootschalige erosie en sedimentatie patronen te reproduceren voor de periode 1998-2002. De locaties waar gebaggerd moet worden kunnen door het model zeer goed bepaald worden. Ook de baggervolumes worden door het model over het algemeen goed berekend. Indicatoren voor de reproductienaauwkeurigheid laten zien dat de bodemverschillen in macrocellen 2 en 4 goed door het model berekend worden. Macrocellen 1, 3 en 7 laten ook goede cijfers zien. De verschillen in macrocellen 5 en 6 worden minder goed voorspeld door het model. Voor alle macrocellen geldt dat het teken van de bodemontwikkeling (erosie of sedimentatie) per rooster cel, voor ongeveer 65% van de cellen goed door het model berekend wordt, ook voor macrocellen 5 en 6. De performance van de voorspelling voor de gehele Westerschelde is een  $R^2$  van 0.27 een Brier-Skill Score van 0.19 en voor 66.4% van de rooster cellen wordt het juiste teken voorspeld.

Een vergelijking met de Delft3D resultaten laat zien dat het erosie/sedimentatie patroon grotendeels overeenkomt. In bepaalde gebieden presteert FINEL2d beter en omgekeerd. Vaak zijn de patronen in het ene model net iets sterker dan in het andere model. De berekende baggervolumes zijn te hoog voor Delft3D en FINEL2d iets te lage waardes maar deze liggen wel dicht bij de werkelijke volumes. Beide modellen tonen de waargenomen afnemende trend in de tijd.



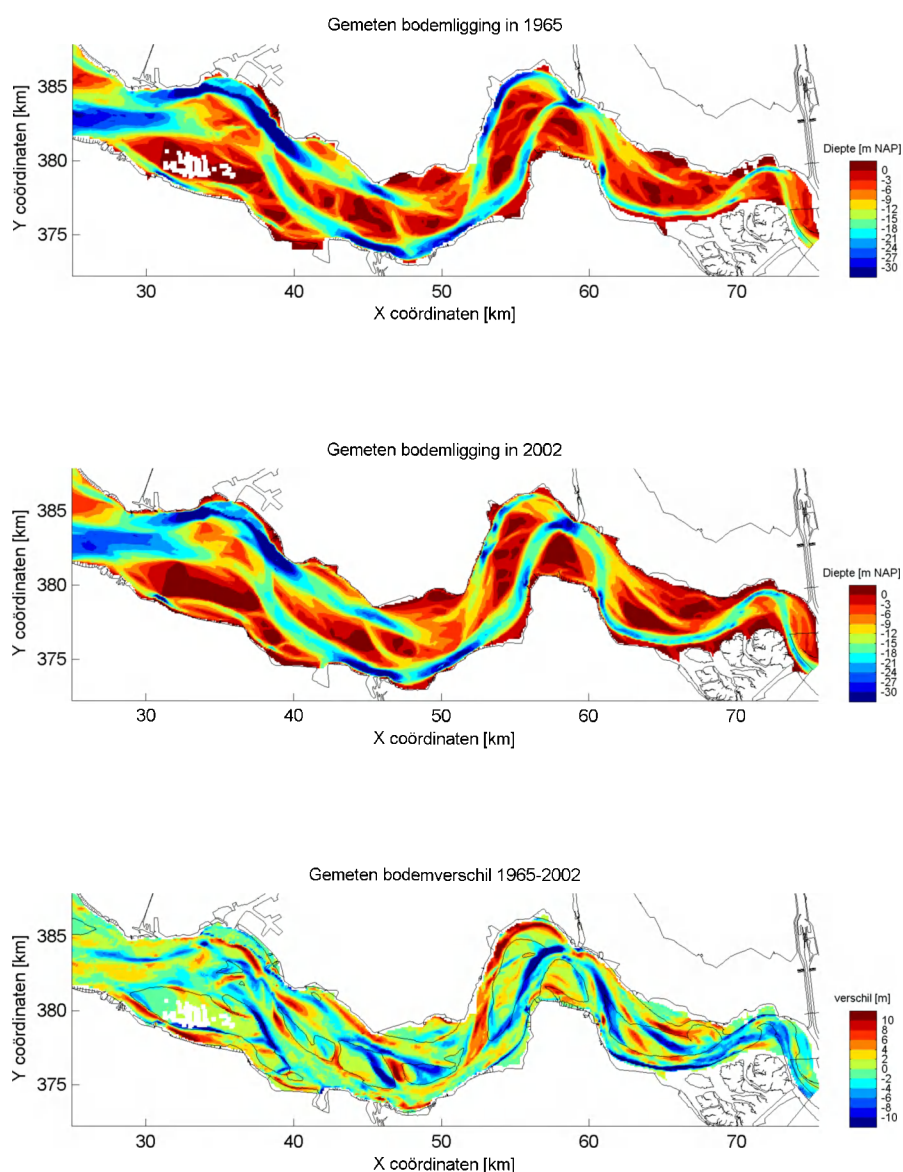
*Figuur 6.11: Erosie/sedimentatie gemeten en berekend met FINEL en Delft3d voor de periode 1998-2002*



## VALIDATIE CASE 1: MORFOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN 1965-2002

### 7.1 Inleiding

Voor de morfologische optimalisatieslag is gekozen om 4 jaar te beschouwen (1998 – 2002) vanwege enerzijds de rekentijden en anderzijds om zo een vergelijking met de Delft3D-schematisatie mogelijk te maken (zie vorig hoofdstuk). Het uiteindelijke doel van de actualisatie van FINEL is om langjarige berekeningen uit te voeren van enkele decennia tot honderd jaar. Om extra vertrouwen te krijgen in de reproductienauwkeurigheid van FINEL2d over langere tijdschalen (decennia) is als validatiecase gekeken naar de periode 1965 -2002 (38 jaar). Dit is dezelfde periode als eerder gesimuleerd in Dam (2006), maar zal nu uitgevoerd worden met de geoptimaliseerde instellingen.



Figuur 7.1: Gemeten bodems in 1965 en 2002 + het bodemverschil 1965 -2002

In Figuur 7.1 zijn de gemeten bodems van 1965 en 2002 en de bodemontwikkeling geplott. Getracht wordt deze ontwikkeling te simuleren met het geoptimaliseerde FINEL2d model.

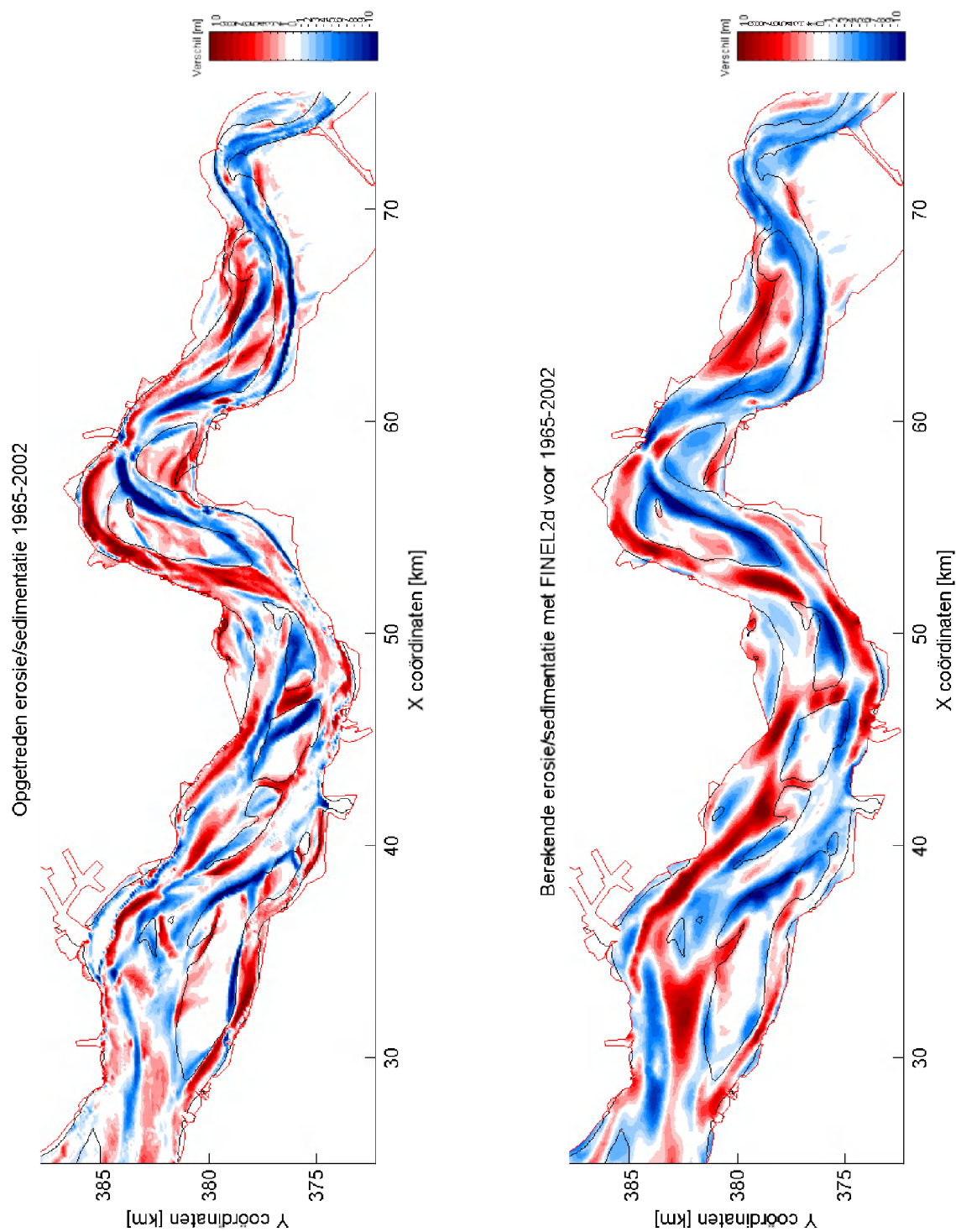
## 7.2 Invoer

De parameter instellingen zijn gelijk aan Run #05 uit het vorig hoofdstuk. Verder wordt de bodem uit 1965 gebruikt als invoer (zie Figuur 7.1). Voor elk jaar worden bagger/stort- en zandwinpolygonen gedefinieerd. De baggervakken worden op een bepaalde diepte bijgehouden in het model en het gebaggerde volume wordt gestort in de stortvakken volgens een verdeling die per jaar kan verschillen (zie Dam (2006) voor de details van elk jaar). Zandwinnen wordt ook per jaar gedefinieerd in vastgestelde polygonen. De zandwinvolumes worden evenredig verdeeld binnen deze polygonen. Voor deze berekening wordt 1 jaar gebruikt om het model in te laten spelen.

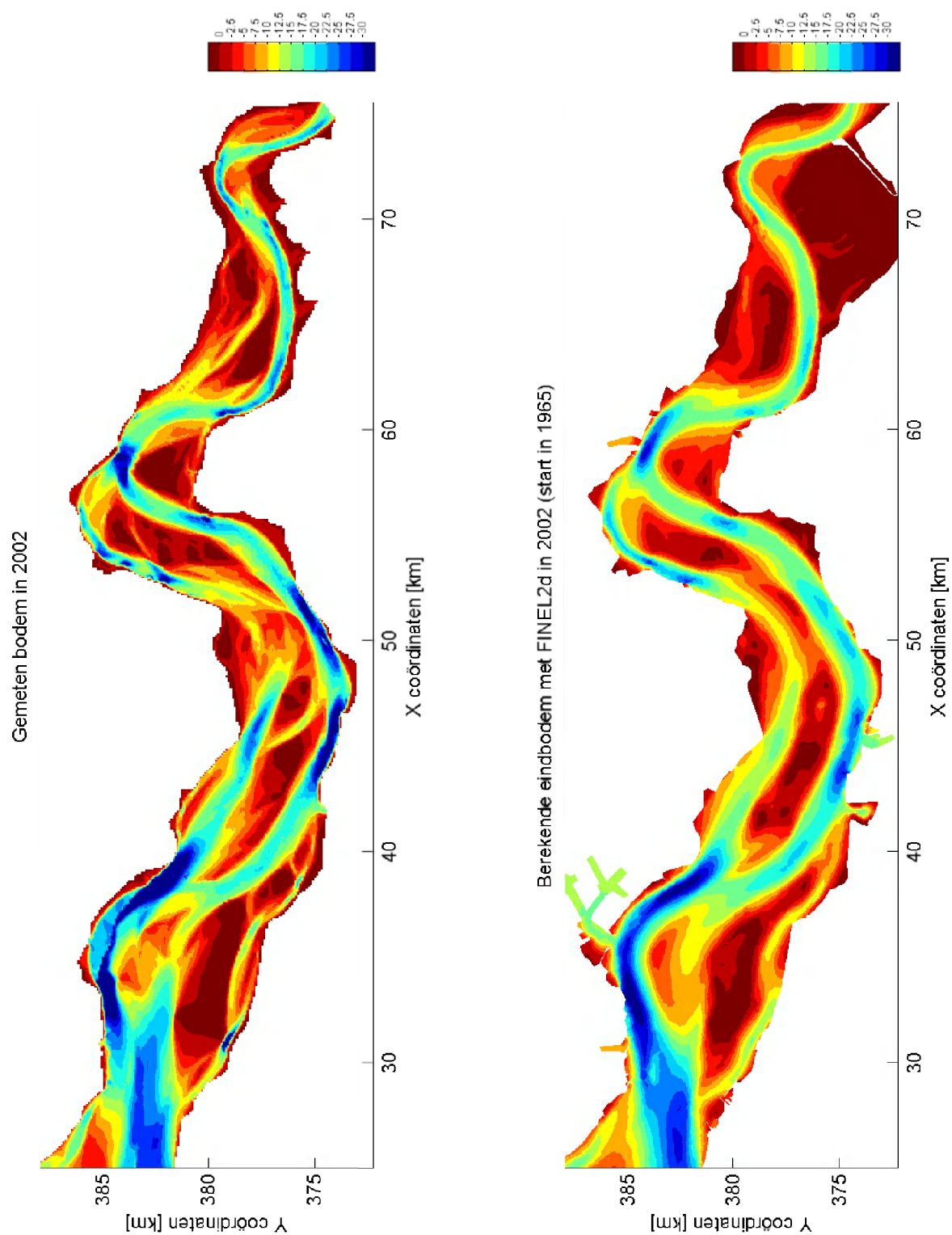
## 7.3 Resultaten FINEL2d berekening

In Figuur 7.2 is het gemeten en het berekende erosie/sedimentatie patroon getoond voor de periode 1965-2002. Figuur 6.3 toont de gemeten en berekende eindbodem in 2002. Het erosie/sedimentatie patroon komt op het eerste gezicht goed overeen. Vooral de sedimentatie in het Middelgat en de erosie van het Gat van Ossenisse wordt door het model goed berekend. Verder is de erosie in het oostelijk deel van de vaargeul goed terug te zien in het model. De uitbocht van het Zuidergat wordt door het model goed beschreven. Globaal kan gezegd worden dat de ontwikkelingen in de hoofdgeulen goed door het model beschreven worden. Het beschrijven van de kleinere (neven)geulen gaat meestal minder goed, waarschijnlijk door de gebruikte resolutie. De doorbraak van de Schaar van Valkenisse wordt door het model niet voorspeld. In plaats daarvan wordt de Zimmermangeul breder (Figuur 7.3). De grote berekende sedimentatie in de monding gedurende de optimalisatieslag (vorig hoofdstuk) is ook hier zichtbaar, terwijl in werkelijkheid geen grote sedimentatie plaatsvindt. De intergetijdengebieden vertonen in het model een lichte erosie. Over het algemeen komen de resultaten min of meer overeen met Dam (2006), alleen vond in die studie een sterkere afname van het intergetijdengebied plaats.

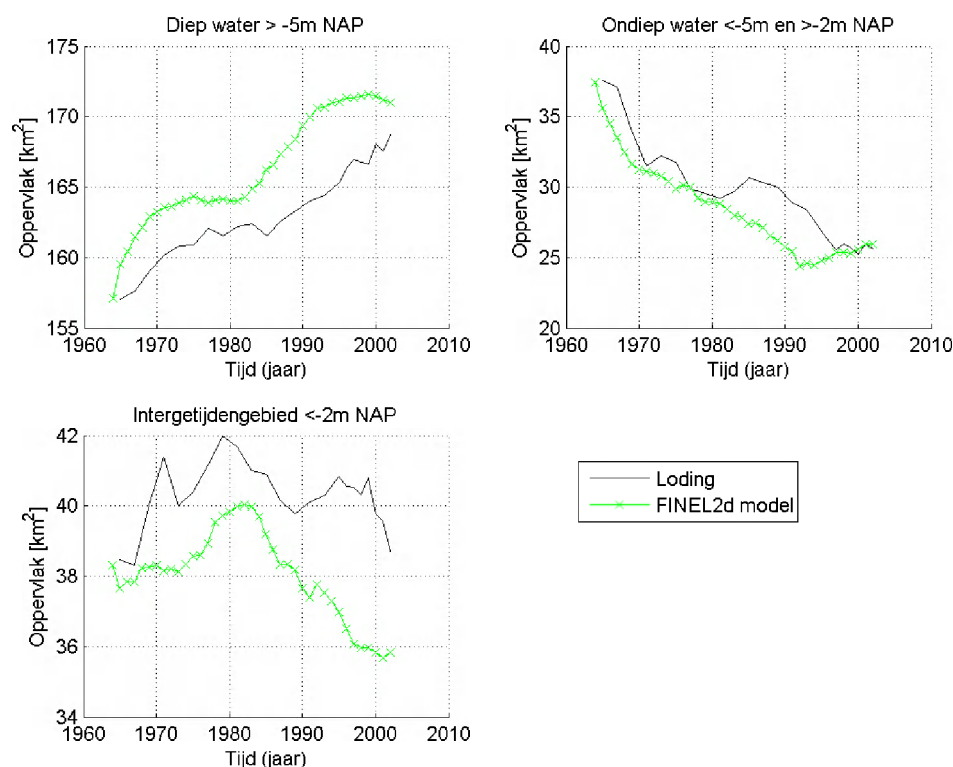
In Figuur 7.4 is de areaalontwikkeling te zien van diep water, ondiep water en intergetijdengebied. Het model berekend de trends redelijk goed. Het areaal diep water neemt toe in zowel meting als model (de trend is iets te sterk in het model). Het areaal ondiep water neemt af in zowel meting als model. Het areaal intergetijdengebied vertoont eerst een stijging in zowel de meting als het model, maar neemt af na 1980. Uiteindelijk is het berekende areaal kleiner dan het werkelijke areaal. Dit heeft voor een deel te maken met het aanwezige slib in het intergetijdengebied. Dit geeft een cohesieve bodem en kan daardoor minder snel eroderen endit effect is niet in de berekening meegenomen. Ten opzichte van Dam (2006) is er een duidelijke verbetering in de areaalontwikkeling.



Figuur 7.2: Gemeten en berekend erosie/sedimentatie patroon 1965 - 2002



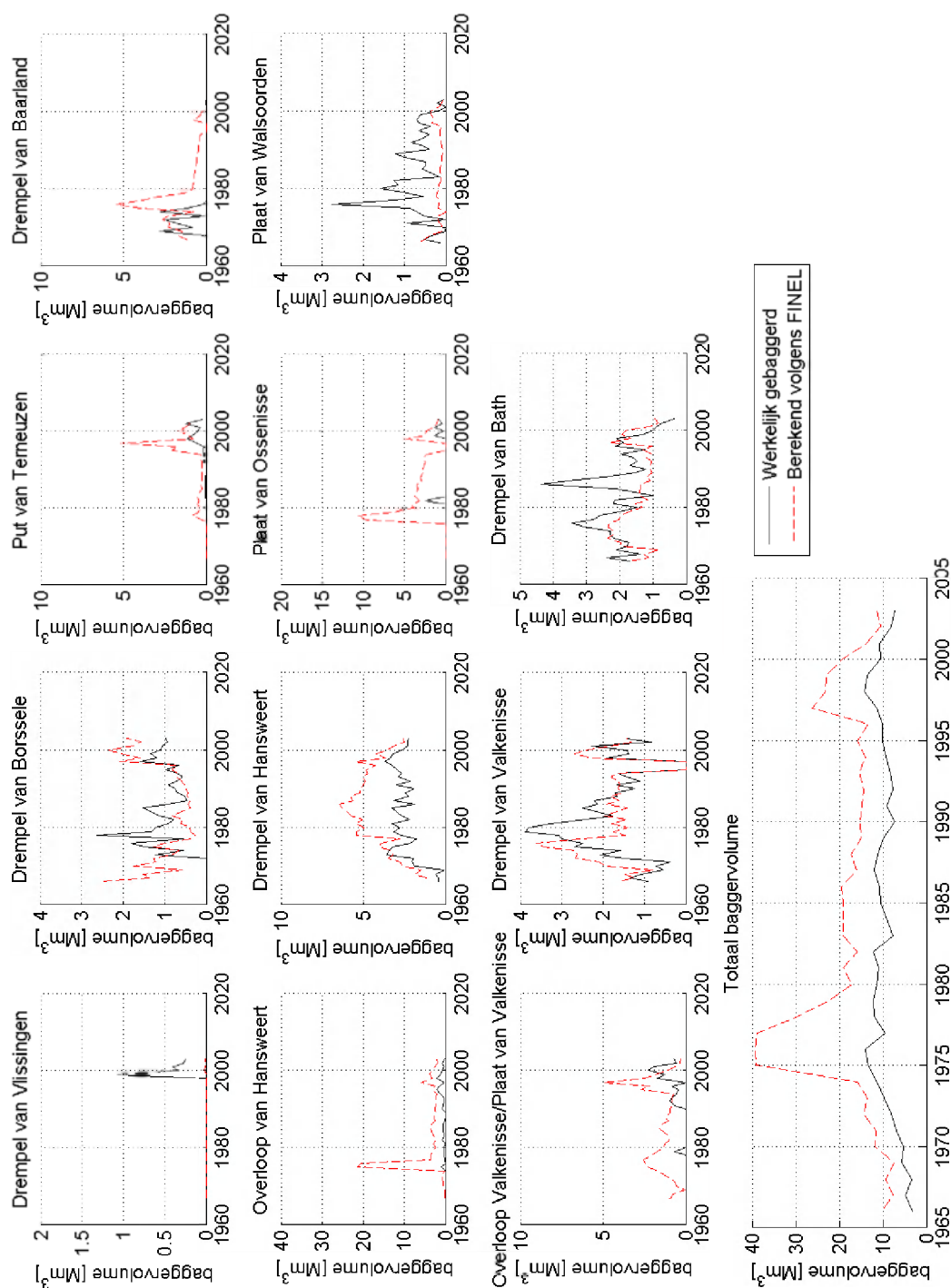
Figuur 7.3: Gemeten en berekende bodemligging in 2002 (start in 1965)



Figuur 7.4: Areaalontwikkeling 1965-2002 voor diep water, ondiep water en intergetijdengebied; meting en model

Figuur 7.5 toont de werkelijke versus de berekende baggervolumes. Hierbij dient opgemerkt te worden dat in de jaren 70 en rond 1998 een verdieping van de vaargeul heeft plaatsgevonden. Dit is terug te zien in de totale baggervolumes die door het model berekend zijn. Het model berekent hier een sterke verhoging van de baggervolumes doordat de vaargeul verdiept wordt in het model. Er is niet uitgezocht hoe dit in werkelijkheid heeft plaatsgevonden (wanneer welke drempel verdiept is), mogelijk kan hier nog een verbeterslag plaatsvinden. Verder zijn in de perioden zonder verdieping de totale baggerhoeveelheden ongeveer een kwart te hoog. De toenemende totale baggervolumes voor de 1e verdieping in de jaren '70 kan het model volgen. Na de verdieping in de jaren '90 neemt het baggervolume sterk af in het model, overeenkomstig de werkelijke baggerhoeveelheden.





Figuur 7.5: Werkelijke en gemodelleerde baggerhoeveelheden 1965-2002

## 7.4 Kwaliteit van de resultaten

De resultaten van de validatieperiode zijn opnieuw geanalyseerd volgens de methode zoals beschreven in paragraaf 6.5. Voor alle roosterpunten is de berekende bodemontwikkeling uitgezet tegen de gemeten bodemontwikkeling. Hierbij is een onderverdeling gemaakt per

macrocel en de gehele Westerschelde, zie Figuur 7.6. De scatterplots zijn geanalyseerd op drie manieren. Ten eerste is het percentage punten bepaald waar het teken van verandering (erosie of sedimentatie) goed is berekend. Ten tweede is de regressiecoëfficiënt  $R^2$  bepaald door de puntenwolken. Ten derde is de Brier-skill score bepaald van elke macrocel en van de gehele Westerschelde.

Tabel 7.1 vat de resultaten samen van alle macrocellen onder het kopje '38 jr'. In de tabel zijn ook de resultaten van de periode 1998-2002 getoond onder het kopje '4 jr'.

Er vallen een aantal zaken op. Ten eerste is het percentage punten met een correct teken ongeveer gelijk voor de korte termijn run (4jr) en de lange termijn run (38 jr). Ten tweede valt op dat een aantal macrocellen beter gaan presteren op de lange termijn. Macrocel 4 wasal goed voor de korte termijn, maar wordt nog beter. Macrocel 5 (Zuidergat/Schaar van Waarde) wordt een vrij goed presterende macrocel op de lange termijn, terwijl op de korte termijn de resultaten minder zijn. De resultaten van Macrocel 6 worden minder slecht op de lange termijn. De BSS waarde van deze macrocel wordt minder negatief en het percentage punten met een goed teken komt uit op 73%. Macrocel 7 laat een beduidend hogere BSS zien op de lange termijn en ook een hoger percentage goede punten, maar de  $R^2$  gaat iets naar beneden. Voor macrocellen 1, 2 en 3 geldt dat deze minder gaan presteren op de lange termijn en de indicatoren van deze macrocellen worden minder. Voor de gehele Westerschelde geldt dat het percentage punten met een correct teken ongeveer gelijk blijft (van 66.4 naar 64.4%). De regressiecoëfficiënt  $R^2$  blijft verrassend gelijk voor beide tijdsperiodes (van 0.266 naar 0.262). De Brier-skill score gaat wel duidelijk omlaag van 0.192 voor 4 jaar naar 0.04 voor 38 jaar.

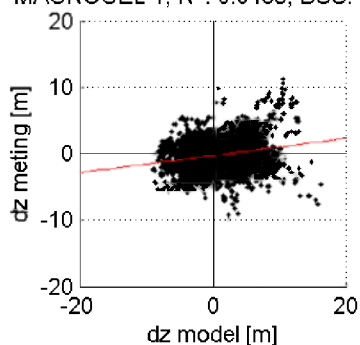
Geconcludeerd kan worden dat het op lange termijn modelleren van de Westerschelde waarde heeft. Het percentage punten met een correct teken blijft rond 2/3 van de punten hetgeen opvallen is. Ook de regressiecoëfficiënt van de gehele Westerschelde blijft verrassend rond de 0.26. De macrocellen 1, 3 en 6 presteren het slechtst en daarmee moet rekening gehouden worden voor toekomstige berekeningen als de reproductie van deze macrocellen niet kan worden verbeterd.

Tabel 7.1: Indicatoren voor de kwaliteit van de resultaten voor de korte run (4jr) en lange run (38 jr)

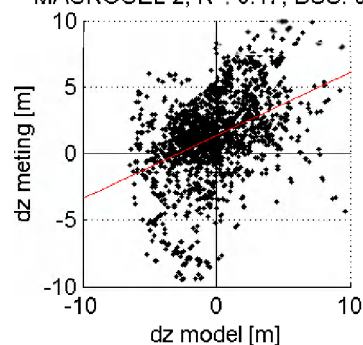
|                      | % punten goed |       | $R^2$ |        | BSS    |        |
|----------------------|---------------|-------|-------|--------|--------|--------|
|                      | 4 jr          | 38 jr | 4 jr  | 38 jr  | 4 jr   | 38 jr  |
| Macrocel 1           | 65,2          | 59,3  | 0.242 | 0.0485 | 0.178  | -1.76  |
| Macrocel 2           | 62,4          | 60,1  | 0.451 | 0.17   | 0.564  | 0.16   |
| Macrocel 3           | 68,4          | 64,0  | 0.298 | 0.214  | 0.259  | -0.17  |
| Macrocel 4           | 68,7          | 69,5  | 0.431 | 0.561  | 0.401  | 0.565  |
| Macrocel 5           | 65,9          | 64,9  | 0.194 | 0.312  | -0.164 | 0.222  |
| Macrocel 6           | 65,0          | 73,0  | 0.052 | 0.0089 | -2.01  | -0.168 |
| Macrocel 7           | 68,6          | 73,8  | 0.263 | 0.127  | 0.279  | 0.435  |
| Gehele Westerschelde | 66,4          | 64,4  | 0.266 | 0.262  | 0.192  | 0.0399 |



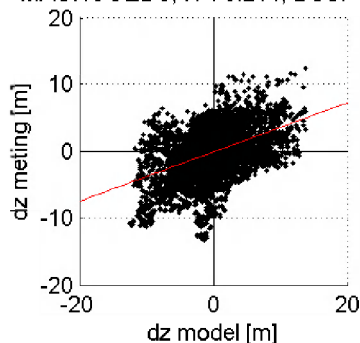
MACROCEL 1;  $R^2$ : 0.0485; BSS: -1.76



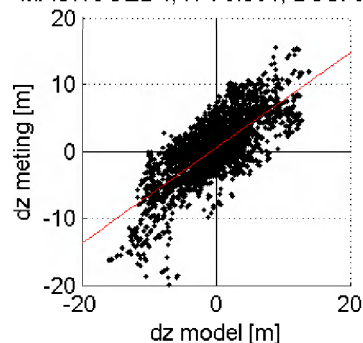
MACROCEL 2;  $R^2$ : 0.17; BSS: 0.16



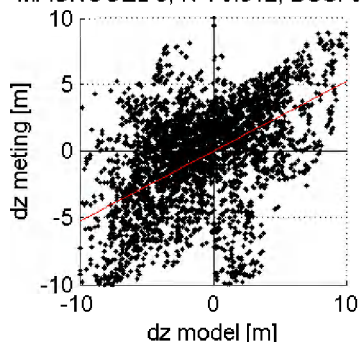
MACROCEL 3;  $R^2$ : 0.214; BSS: -0.17



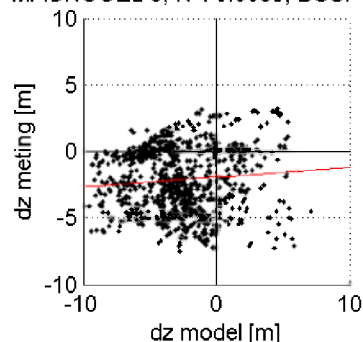
MACROCEL 4;  $R^2$ : 0.561; BSS: 0.565



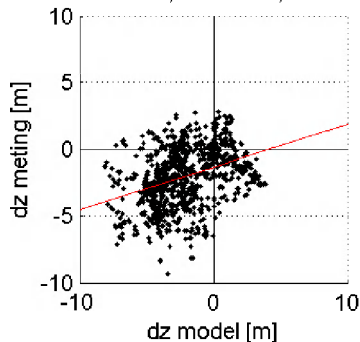
MACROCEL 5;  $R^2$ : 0.312; BSS: 0.222



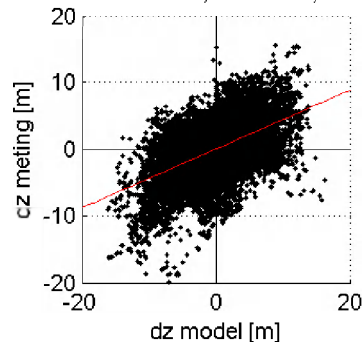
MACROCEL 6;  $R^2$ : 0.0089; BSS: -0.168



MACROCEL 7;  $R^2$ : 0.127; BSS: 0.435



Gehele Westerschelde;  $R^2$ : 0.262; BSS: 0.0399



Figuur 7.6: Per roosterpunt de bodemverandering dz van model uitgezet tegen bodemverandering van meting voor periode 1998-2002. Macrocel 1 is monding; macrocel 7 is bij de Nederlands/Vlaamse grens

## 7.5 Conclusie

Geconcludeerd kan worden dat het geoptimaliseerde FINEL2d in staat is om de meeste grootschalige morfologische ontwikkelingen voor de periode 1965-2002 te reproduceren. Het model is in staat om de trend van de oppervlaktes van diep water/ondiep water /intergetijdengebied te reproduceren, hoewel de intergetijdengebieden een lichte erosieve trend vertonen in het model die in werkelijkheid niet is. De ontwikkelingen van kleinere (kortsluit)geulen worden minder goed berekend door het model. De berekende baggervolumes zijn iets te hoog in het model, maar volgen de toe- en afnemende trend in volumes in de jaren '60 en in de laatste jaren na de 2e verdieping. Tijdens verdiepingen zelf zijn de berekende baggerhoeveelheden duidelijk aan de te hoge kant.

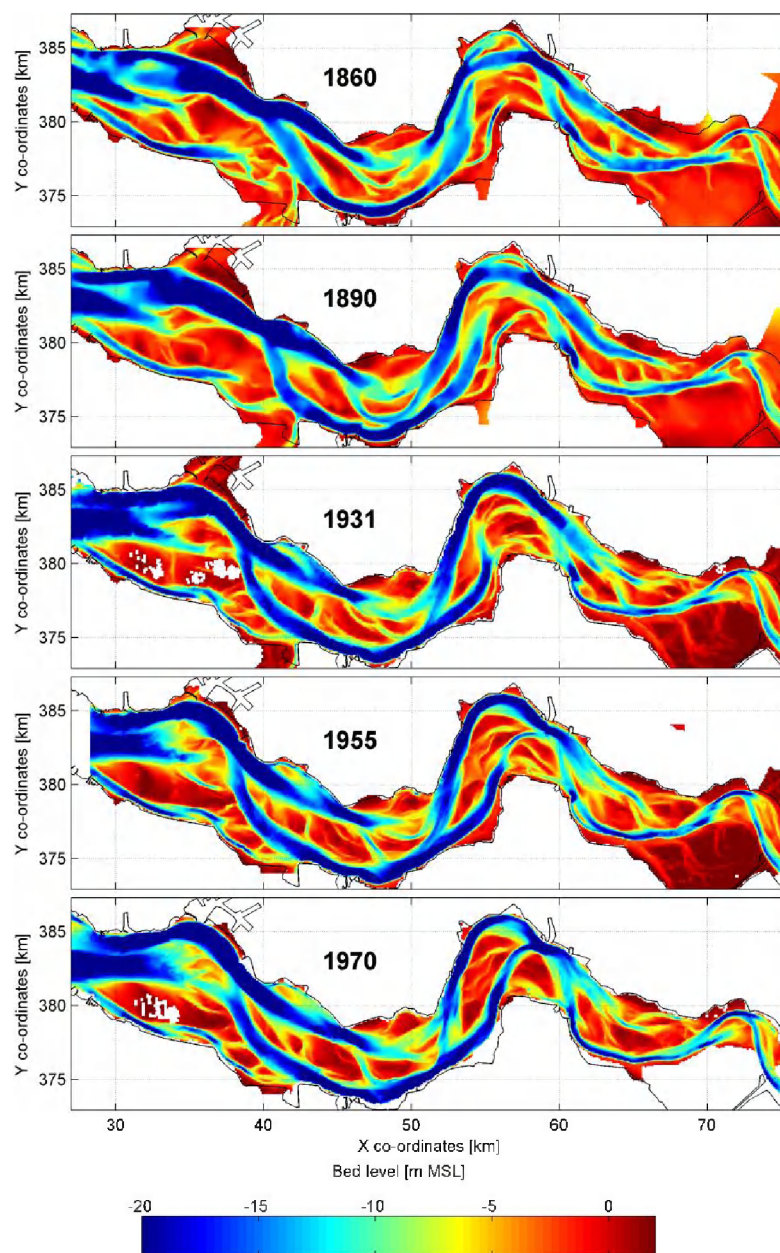
Indicatoren voor de reproductienauwkeurigheid tonen aan dat lange termijn modelleren zin heeft. Een aantal macrocellen tonen betere indicatoren voor de lange termijn dan de korte termijn, dit zijn macrocellen 4, 5, 6 en 7 (het midden en oostelijk deel). Ongeveer 2/3 van de roosterpunten kan goed voorspellen of er erosie dan wel sedimentatie plaats vindt. Dit percentage is niet veranderd ten opzichte van de korte termijn berekening van 4 jaar en is vrijwel gelijk voor alle macrocellen. De regressiecoëfficiënt (dz model versus dz meting) voor de gehele Westerschelde blijft 0.26 voor zowel de korte (4 jr) als de lange termijn (38 jr). De Brier-Skill Score wordt echter minder op lange termijn. Deze gaat van 0.19 op korte naar 0.03 voor de 38 jarige hindcast periode. De slechter presterende macrocellen voor de 1965-2002 hindcast zijn de cellen 1, 3 (westelijk deel) en 6 (oostelijk deel). In het volgend hoofdstuk wordt nog een hindcast uitgevoerd voor een 110 jaar periode.

### 8.1 Inleiding

*(De resultaten van dit hoofdstuk zijn ook gepubliceerd in Dam et al., 2013)*

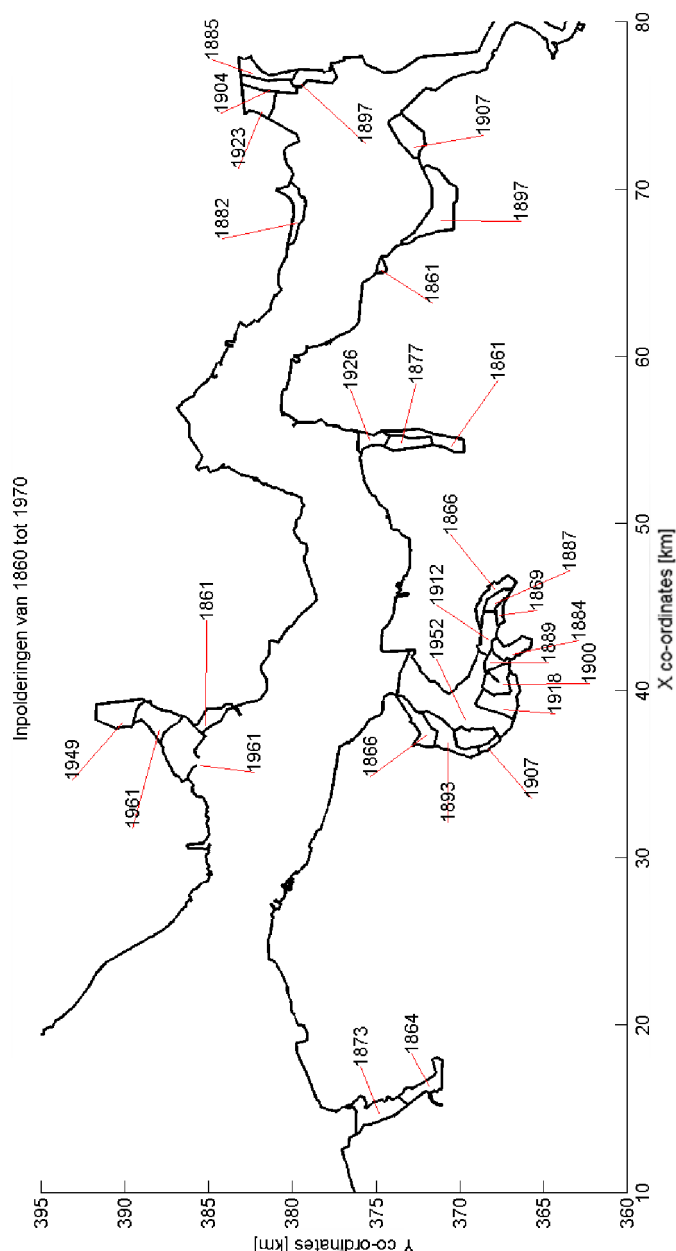
Een tweede validatiecase betreft de morfologische ontwikkelingen van 1860 tot 1970. Het voordeel van deze periode is dat grote baggerwerken nog niet hebben plaatsgevonden. Pas na 1970 zijn verdiepingen uitgevoerd. De beginbodem in 1860 is gedigitaliseerd door Rijkswaterstaat. Onbekend is wat de kwaliteit is van deze bodemdata, maar algemeen kan aangenomen worden dat de geulligging accurater zal zijn dan de gegeven dieptes.

In Figuur 8.1 zijn de bodemliggingen te zien van 1860 tot en met 1970.



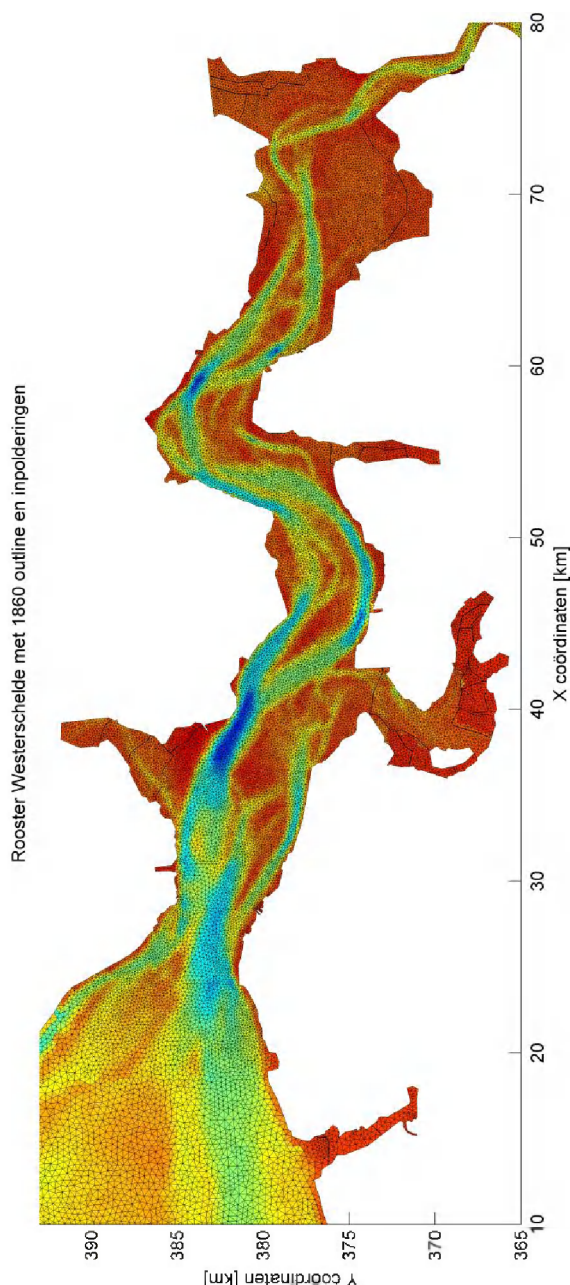
Figuur 8.1: Bodeopnames Westerschelde 1860 - 1970

Van 1960 tot en met 1970 hebben een aantal inpolderingen plaatsgevonden. In Figuur 8.2 is weergegeven welke polder wanneer ingepolderd is. Vooral de inpoldering van de Braakman is een significante oppervlaktevermindering geweest ten gevolge gehad. De Sloedam (door het Sloe) en de Kreekrakdam (tussen Ooster- en Westerschelde) zijn rond 1870 aangelegd ten bate van de spoorlijn Bergen op Zoom- Vlissingen. In het model is aangenomen dat deze aan het begin van de berekening al dicht is. Daarnaast is de Sloehaven aangelegd in de jaren '60 van de 20<sup>e</sup> eeuw. Deze oppervlaktevergroting is niet geschematiseerd, maar de havendammen die in 1961 aangelegd zijn worden wel in 1961 aan het model toegevoegd. De outline van 1860 is gebruikt om een nieuw rekenrooster te maken voor deze validatie case (zie Figuur 8.3).



Figuur 8.2: Inpolderingen Westerschelde 1860 - 1970

De inpolderingen zijn geschematiseerd in het FINEL2d model door dammen rond de inpolderingen te plaatsen het jaar dat een gebied ingepolderd is. De bodem van de inpolderingen in 1860 is niet bekend, maar is geschat aan de hand van de huidige bodemligging (AHN). Elk jaar waarin een gemeten bodem bekend is, wordt vergeleken met de berekende bodem en een Brier-skill score wordt bepaald. Op deze manier kan iets gezegd worden over de betrouwbaarheid van (zeer) lange termijn morfologie modellering door het FINEL2d model.



*Figuur 8.3: Rekenrooster Westerschelde met 1860 outline en inpolderingen (dikke zwarte lijn)*

## 8.2 Resultaten

Met het FINEL2d model is 110 jaar doorgerekend vanaf 1860. Het uiteindelijke berekende en waargenomen erosie/sedimentatie patroon is getoond in Figuur 8.4. Te zien is dat veel waargenomen veranderingen overeen komen met de berekende veranderingen. Vooral de veranderingen in macrocellen 1 t/m 4 worden vrij goed berekend. Het is bekend dat er al gebaggerd werd in het oostelijk deel van de Westerschelde vanaf de jaren '30. In het model is baggeren echter niet meegenomen in de berekening en dit lijkt een goede verklaring waarom het oostelijk deel minder goed gereproduceerd wordt. In Figuur 8.5 zijn de Brier-Skill Scores (BSS) per macrocel over de tijd getoond. Hieruit blijkt dat de macrocellen 1 t/m 4 inderdaad grote positieve BSS waardes vertonen. Macrocel 5 vertoont alleen op het eind van de berekening positieve BSS waardes. Macrocellen 6 en 7 laten negatieve waardes zien. Dit laatste heeft waarschijnlijk te maken met dat er in het model geen rekening gehouden is met rond de drempel van Valkenisse en Bath.

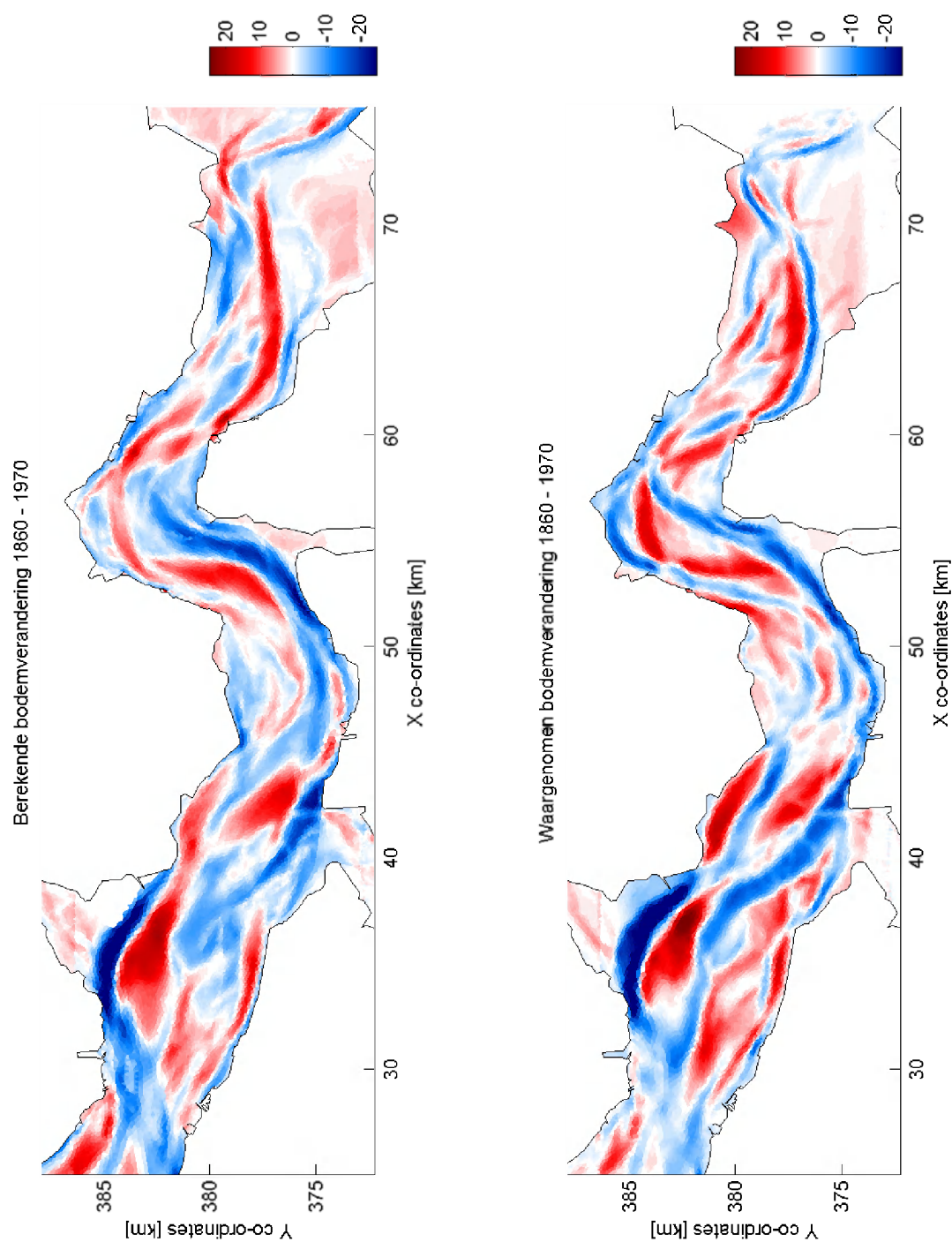
In zowel het paneel rechtsonder van Figuur 8.5 als in het bovenste paneel van Figuur 8.6 is de BSS waarde over de tijd getoond van de gehele Westerschelde. Uit deze grafiek blijkt dat de BSS waarde stijgt in de loop van de tijd. De eerste decennia is de BSS waarde negatief. De BSS waarde stijgt vervolgens door naar een positieve waarde, met de hoogste waarde aan het eind van de berekening. De uiteindelijke BSS score bedraagt 0.45 in 1970. Het lijkt dat het model steeds beter presteert over de loop van de tijden geen goede patronen kan produceren in de eerste decennia van de berekening (negatieve BSS waardes). In het onderste paneel van Figuur 8.6 is dit verder verduidelijkt door de gemiddelde modelfout van de gehele Westerschelde over de tijd te tonen. De modelfout is bepaald door van elk roosterpunt het verschil tussen de berekende bodem en de (geïnterpoleerde) meting te bepalen om dit vervolgens te middelen over de Westerschelde. Het blijkt dat de gemiddelde modelfout over de loop van de tijd iets toeneemt van 3m tijdens de eerste vergelijking in 1878 naar 4.5m in 1970. In hetzelfde figuur is ook het 'signaal' getoond. Dit is berekend door de gemeten bodem van dat jaar af te trekken van de 1860 bodem en vervolgens worden alle punten gemiddeld. Het signaal, de gemiddelde bodemverandering over de gehele Westerschelde, neemt sterk toe over de tijd. Omdat het signaal sterker toeneemt dan de modelfout worden steeds betere BSS waardes verkregen. De BSS is namelijk gedefinieerd als  $1 - \text{modelfout}^2 / \text{signaal}^2$ . Dit geeft aan dat met het model zinnige uitspraken gedaan kan worden op een termijn van 110 jaar, omdat het signaal groter is dan de modelfout op deze tijdschaal.

In Figuur 8.7 is de totale BSS nog eens uitgezet voor roosterpunten met een bepaalde minimum absolute bodemverandering dz. Het blijkt dat het model beter scoort voor punten met een grotere bodemverandering. Zo is de BSS over de gehele tijdsperiode voor een minimum bodemverandering van 5 m constant groter dan 0.6. Hieruit blijkt dat het model vooral geschikt is voor grootschalige morfologische trends. Deze trends worden zichtbaarder op de lange termijn doordat de veranderingen groter worden. Dit is de oorzaak voor het stijgen van de BSS over de tijd.

De regressiecoëfficiënt ( $R^2$ ) tussen de waargenomen bodemverandering en de berekende bodemverandering is 0.52. Het percentage roosterpunten met een correct teken (erosie of sedimentatie) is vrij constant over de berekening met ongeveer 70%.

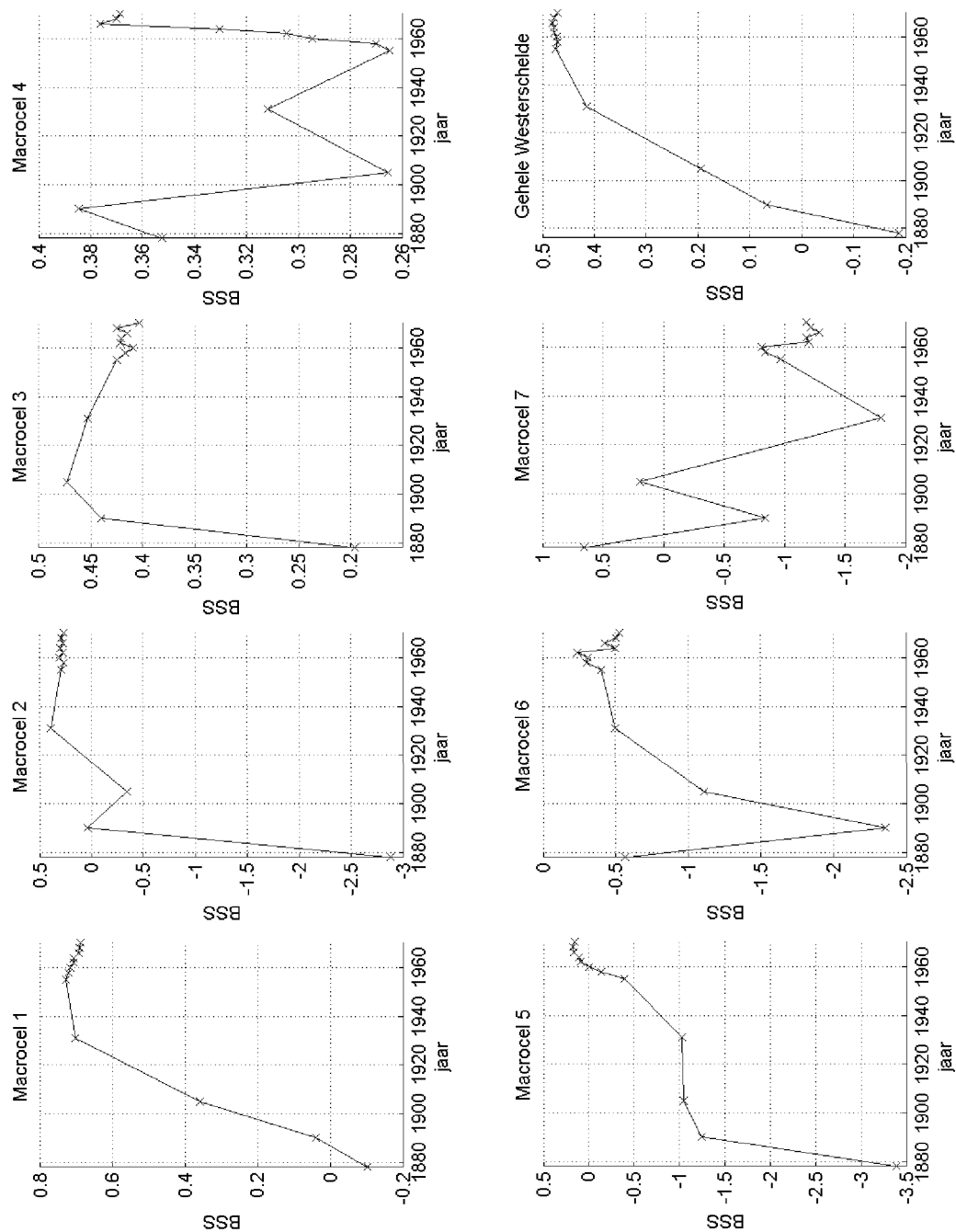
Samenvattend kan gezegd worden dat het model vooral geschikt is voor morfologische ontwikkelingen op grote schaal en lange termijn. Op korte termijn is het model niet geschikt omdat de ontwikkelingen zich binnen de modelfout bevinden.



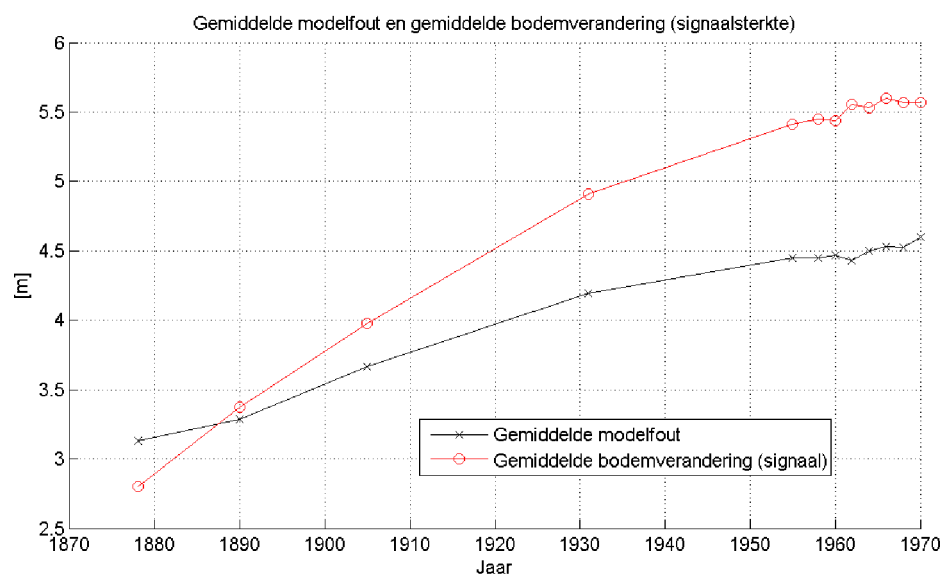
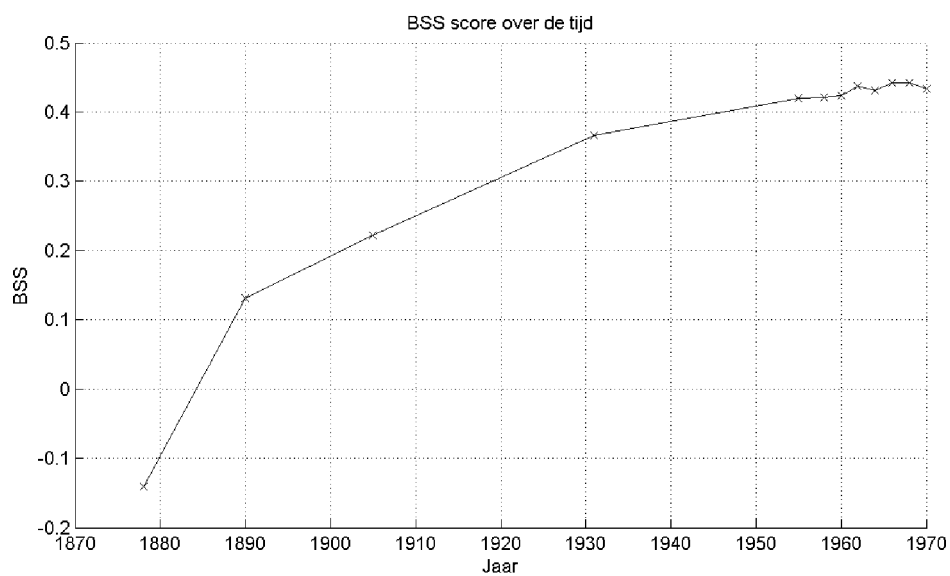


Figuur 8.4: Berekende en waargenomen erosie/sedimentatie patroon 1860-1970

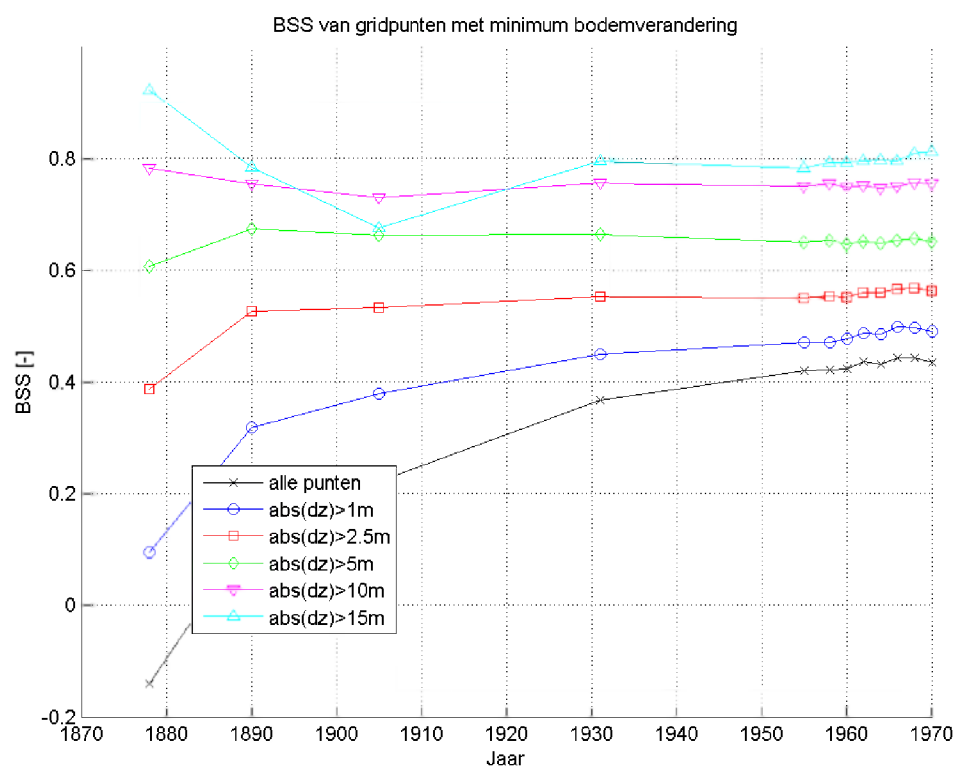




Figuur 8.5: Brier-skill score per macrocel en gehele Westerschelde over de tijd



Figuur 8.6: Brier-skill score (bovenste paneel) en gemiddelde modelfout en bodemverandering (onderste paneel) over de tijd van de gehele Westerschelde

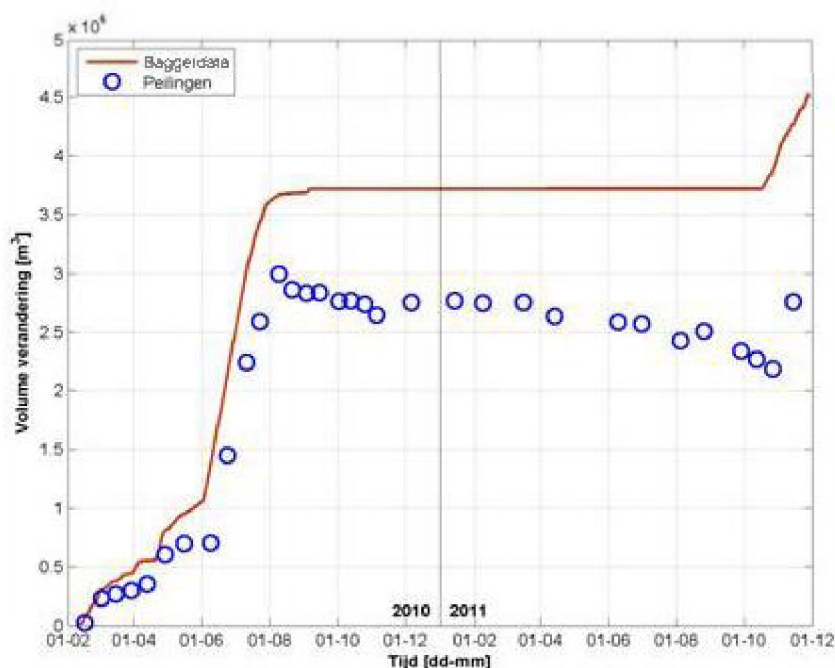


Figuur 8.7: Brier-skill score voor punten met bepaalde minimum bodemverandering (dz)

### 9.1 Inleiding

Met FINEL2d is de plaatrandstorting bij de Plaat van Walsoorden tussen februari 2010 en november 2011 gesimuleerd. Hierbij is de gekeken naar de erosie- en sedimentatiepatronen en de volumes.

In Figuur 9.1 is de werkelijke evolutie van de volumes weergegeven. De rode lijn geeft de gestorte hoeveelheden weer. De blauwe bollen, die elk voor een peiling staan, geven het volume weer dat volgt uit de peilingen.

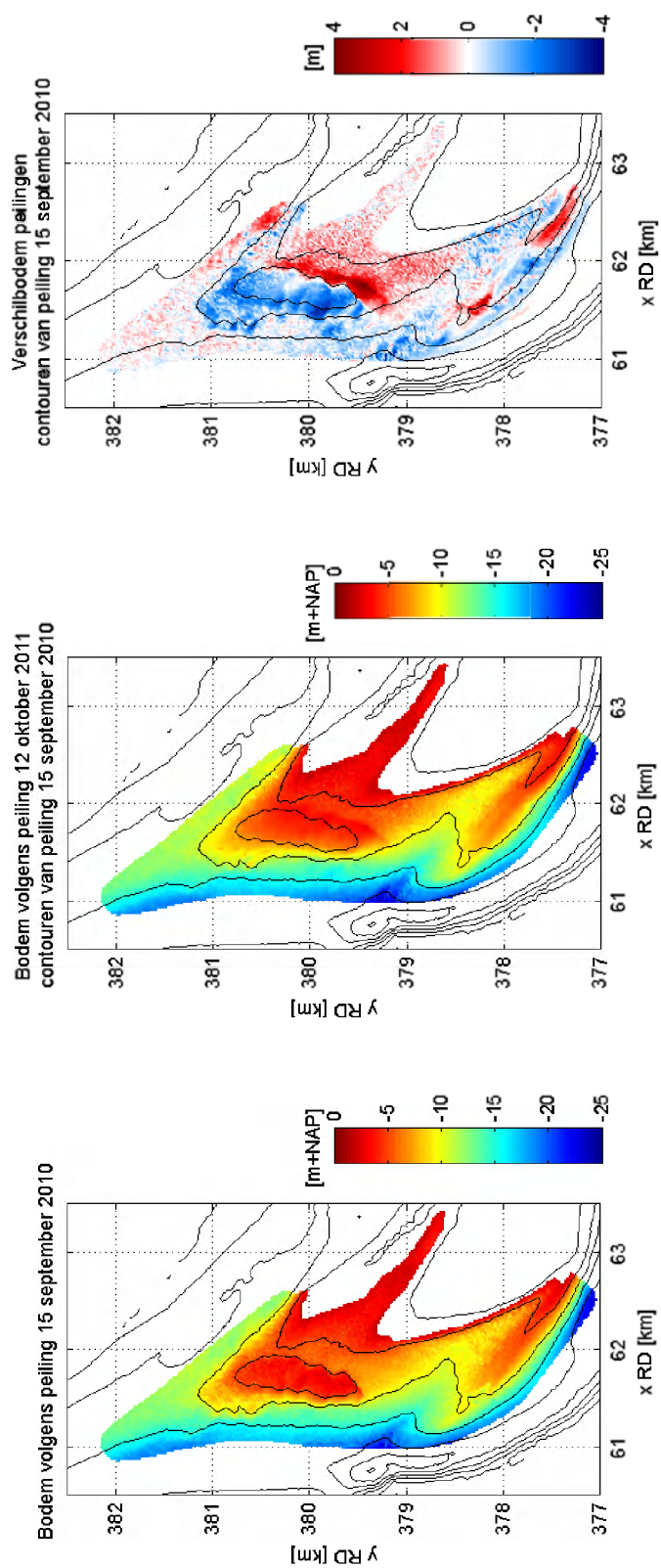


Figuur 9.1: Tijdsverloop van het volume gestort materiaal en het cumulatieve verschilvolume uit de peilingen voor de complete stortzone voor Plaat van Walsoorden (Februari 2010 – November 2011)

Bij de simulatie is gebruik gemaakt van twee van deze peilingen:

- 15 september 2010: Het voorlopig einde van het storten. In Figuur 9.1 is dit het begin van het horizontale deel van de rode lijn. In het eerste paneel van Figuur 9.2 is de peiling zelf weergegeven.
- 12 oktober 2011: De laatste peiling voor de herstart van het storten. In Figuur 9.1 is dit het einde van het horizontale deel van de rode lijn. In het tweede paneel van Figuur 9.2 is de peiling zelf weergegeven.

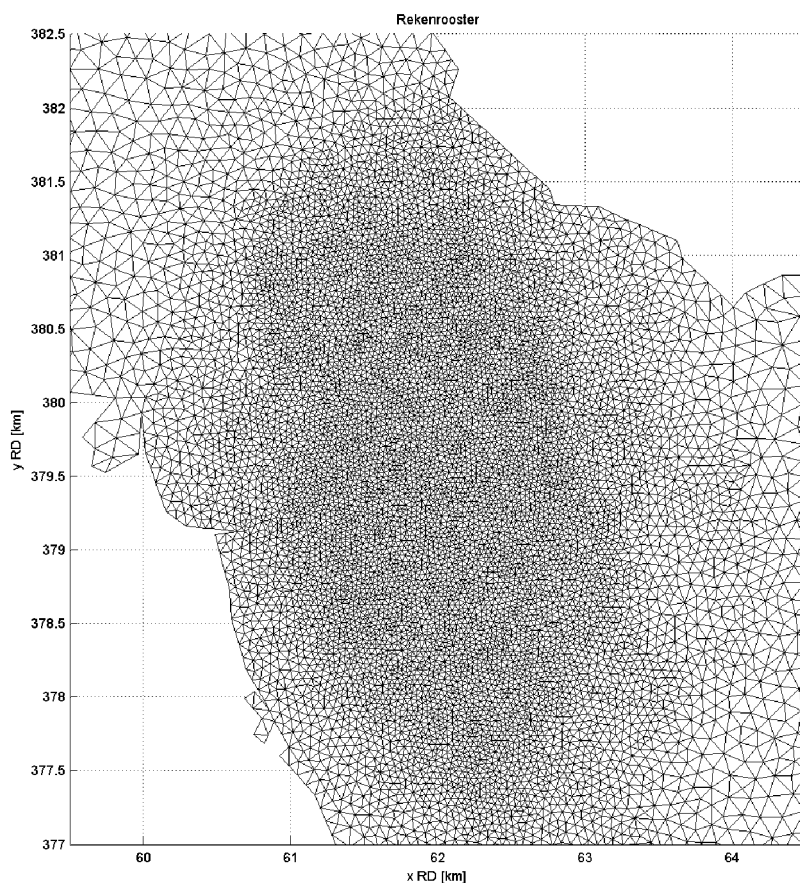
Het verschil tussen deze twee peilingen is weergegeven in het derde paneel van Figuur 9.2. Rood staat voor sedimentatie en blauw voor erosie. De volgende paragraaf beschrijft de uitkomsten van de simulatie.



Figuur 9.2: Bodem op 15 september 2010 (na de storting), bodem op 12 oktober 2011(aan het eind van de stortvrije periode) en het bodemverschil.

## 9.2 Resultaten FINEL2d berekening

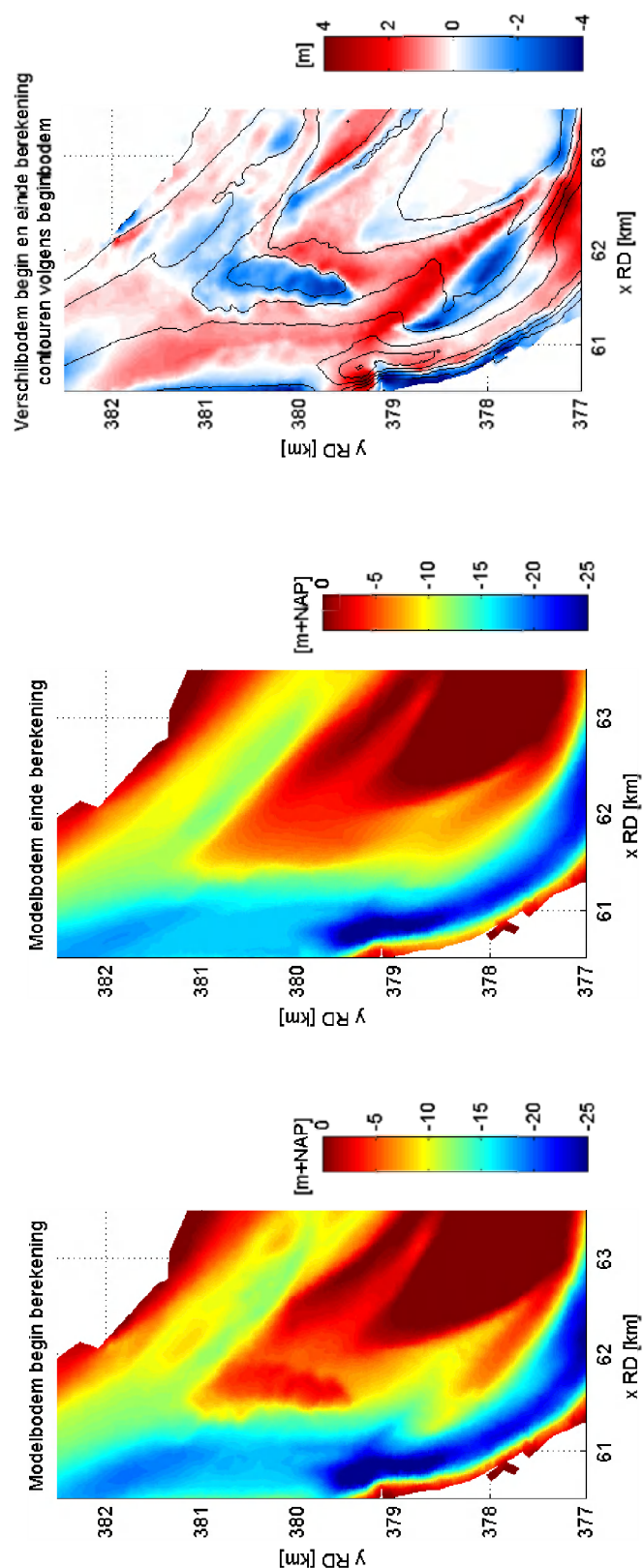
Voor de simulatie is gebruik gemaakt van het FINEL2d Westerschelde model. Op de Plaat van Walsoorden is het rekenrooster verder verfijnd. De kleinste elementen hebben zijden van ongeveer 30 meter. Het rekenrooster bij de Plaat van Walsoorden is weergegeven in Figuur 9.3.



Figuur 9.3: Rekenrooster gebruikt voor Plaatrandstorting Walsoorden

De modelbodem zoals toegepast in deze studie bestaat voor het grootste deel uit een  $20 \times 20 \text{ m}^2$  GIS bodem van de Westerschelde uit 2010 (Rijkswaterstaat Zeeland). De plaatrandstorting is aan de modelbodem toegevoegd door peiling a) in de modelbodem te verwerken. De modelbodem aan het begin van de berekening is weergegeven in het eerste paneel van Figuur 9.4.

Nadat de waterbeweging is ingespeeld, is een complete spingtij-doodtij cyclus morfologisch doorgerekend. Met een versnellingsfactor van 24.75 is dit representatief voor de morfologische ontwikkelingen in een jaar tijd. Omdat tussen de twee gebruikte peilingen 13 maanden zitten, zijn de resultaten met een factor 13/12 geschaald. In de berekening is verder rekening gehouden met het feit dat de vaargeul op diepte gehouden wordt (hoewel er in deze tijd een verdieping van de vaargeul heeft plaatsgevonden), en dat het gebaggerde materiaal in stortvakken wordt gestort volgens een 2001 verdeling van baggeren/storten. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de gesimuleerde plaatrandstorting in de beginbodem van de simulatie is aangebracht en niet 'aangelegd' door de bagger- en stortmodule van het model. Verder wordt er ook door het model geen zand van het vaargeulonderhoud gestort in het interessegebied.



Figuur 9.4: Bodem aan het begin van de modelberekening, bodem aan het eind van de modelberekening en het bodemverschil.



Het resultaat van de berekening is weergegeven in Figuur 9.4. Het eerste paneel geeft de modelbodem aan het begin van de berekening weer en het tweede paneel de modelbodem aan het eind van de modelberekening. Het verschil is weergegeven in het derde paneel, waarbij rood staat voor sedimentatie, en blauw voor erosie.

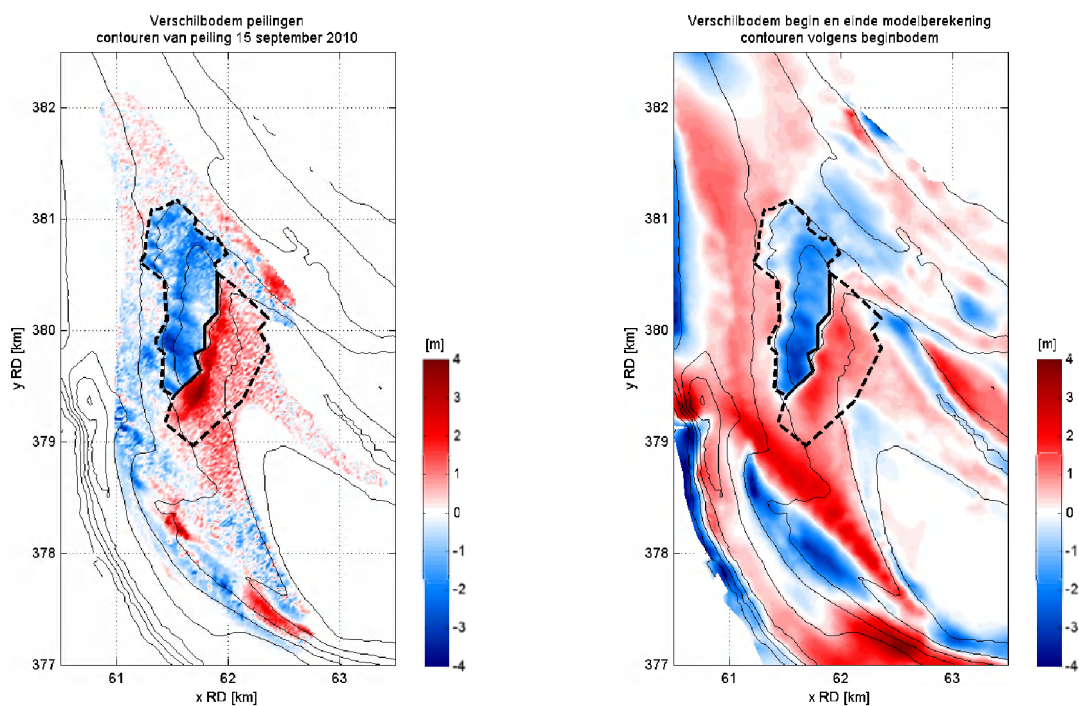
Figuur 9.5 toont zowel het verschil tussen de peilingen als het verschil tussen de begin- en eindbodem van de modelberekening. De stippellijnen geven de polygonen weer die zijn gebruikt om de erosie en sedimentatie ten gevolge van de storting te bepalen. Wanneer het eerste en tweede paneel van Figuur 9.5 met elkaar vergeleken worden, valt direct op dat de erosie en sedimentatie op de Plaat van Walsoorden ruimtelijk gezien goed overeenkomen. De overgang tussen erosie en sedimentatie is op dezelfde locatie te vinden. Ook de zwaartepunten van de erosie en sedimentatie, voor beide in het zuidelijk deel van de polygoon, komen goed overeen. Het zwaartepunt in het sedimentatiegebied is in de modelberekening wel iets minder sterk aanwezig. Het is duidelijk te zien dat de storting richting het zuidoosten migreert in zowel de meting als het model. De storting groeit aan de plaat vast. De vloeddominantie op deze locatie komt daarmee duidelijk terug in het model.

Ten zuiden van de Plaat van Walsoorden zijn de verschillen groter. In het model migreert de spit tussen het vloodschaartje en het Zuidergat richting het noordoosten (tegen de plaat aan), terwijl dit in werkelijkheid morfologisch stabiel is. Mogelijkerwijs heeft baggeren en storten in het model hier iets mee te maken, omdat deze locatie vlak bij de vaargeul ligt.

Het totale volume erosie en sedimentatie binnen de polygonen van Figuur 9.5 zijn weergegeven in Tabel 7.1. De waarden komen behoorlijk goed overeen. Het berekende sedimentatie volume wijkt iets verder af van de gemeten waarden dan het erosie volume.

*Tabel 7.1: Erosie en sedimentatie binnen de polygonen, volgens zowel de peilingen als de modelberekening.*

|                 | Erosie [m <sup>3</sup> ] | Sedimentatie [m <sup>3</sup> ] |
|-----------------|--------------------------|--------------------------------|
| Peiling         | 9.8*10 <sup>5</sup>      | 7.1*10 <sup>5</sup>            |
| Modelberekening | 8.9*10 <sup>5</sup>      | 5.6*10 <sup>5</sup>            |



*Figuur 9.5: Linker paneel: Bodemverschil tussen peiling a) en b). Rechter paneel: Bodemverschil tussen begin en einde modelberekening.*

### 9.3 Conclusies

Geconcludeerd kan worden dat de erosie en sedimentatie van de plaatrandstorting bij Walsoorden goed gereproduceerd kan worden met het FINEL2d model. Zowel het ruimtelijke patroon als de erosie- en sedimentatievolumes komen goed overeen. Ten zuiden van de storting migreert een spit te snel naar de plaat in het model. In werkelijkheid is deze spit redelijk stabiel.

**10.1 Conclusies**

Het FINEL model is geactualiseerd doormiddel van optimalisaties van het rooster, de waterbeweging en de morfologie en het uitvoeren van validaties.

Geconcludeerd kan worden dat het FINEL2d model de waterbeweging goed kan reproduceren. Het model is voldoende betrouwbaar voor de waterstanden in de monding, de Westerschelde en de Zeeschelde (hoofdstuk 3). Een controle op diverse gemeten stroomsnelheden laat een goede reproductie zien. Bij de Put van Borssele komen afwijkingen voor die veroorzaakt worden door de sterke onderstroom in de put. Een korte exercitie met een 3D model toont aan dat deze onderstroom gereproduceerd kan worden (hoofdstuk 5).

De modelresultaten van de morfologie voor de periode 1998-2002 komen in een groot deel van de Westerschelde overeen met de gemeten ontwikkelingen. Op een aantal locaties zoals diepe putten en in de monding zijn afwijkingen te zien. De berekende baggerlocaties en volumes van het FINEL model komen goed overeen met de werkelijkheid. Het model is op vier punten verbeterd ten opzichte van de standaardrun:

- 1) een aangepaste hydraulische ruwheid van het intergetijdengebied.
- 2) een ruimtelijk variërende  $d_{50}$ , waarbij 300  $\mu\text{m}$  in de monding gehanteerd is, geleidelijk afnemend tot 150  $\mu\text{m}$  in het oosten.
- 3) een ruimtelijk variërende valsnelheid van het sediment, gebaseerd op de ruimtelijke  $d_{50}$  van punt 2.
- 4) De niet-erodeerbare laag is aangepast (Dam, 2012).

Al deze 4 punten geven een verbetering van de resultaten (hoofdstuk 6).

Een vergelijking met Delft3D resultaten laat zien dat het erosie/sedimentatie patroon grotendeels overeenkomt. In bepaalde gebieden presteert FINEL2d beter en omgekeerd. Vaak zijn de patronen in het ene model net iets sterker dan in het andere model. De berekende baggervolumes zijn te hoog voor Delft3D, en FINEL2d berekend iets te lage waarden maar deze liggen wel dicht bij de werkelijke volumes. Beide modellen tonen de waargenomen afnemende trend in de tijd.

Drie morfologische validaties zijn uitgevoerd met het geoptimaliseerde FINEL2d model, te weten:

- 1) Grootschalige morfologische ontwikkelingen in de gehele Westerschelde voor 38 jaar; periode 1965- 2002; (hoofdstuk 7)
- 2) Grootschalige morfologische ontwikkelingen in de gehele Westerschelde voor 110 jaar; Periode 1870-1970 (hoofdstuk 8)
- 3) Kleinschalige ontwikkelingen voor de plaatrandstorting van Walsoorden voor 13 maanden (hoofdstuk 9)

Uit de validaties blijkt dat het model in staat is om de grote lijnen van de morfologische ontwikkelingen te volgen:

Ad 1) De langjarige morfologische ontwikkelingen van 1965-2002 worden door het model grotendeels gereproduceerd. Het erosie/sedimentatie patroon komt redelijk goed overeen met de meting. De trends in oppervlakte diep water/ondiep water/ intergetijdengebied worden door het model gereproduceerd, hoewel het intergetijdengebied in het model te sterk erodeert. De baggervolumes zijn aan de hoge kant, maar volgen de algemene trends van toe- en afname. Tijdens de verdiepingen van de vaargeul zijn de berekende volumes te hoog.

Ad 2) De validatie van de periode 1860-1970 laat zien dat het model steeds beter presteert over de tijd. Het model kan vooral de grootschalige ontwikkelingen met een redelijke nauwkeurigheid voorspellen. Een Brier-skill score van 0.45 wordt gevonden na 110 jaar.

Ad 3) De plaatrandstorting van Walsoorden wordt zeer goed door het FINEL2d model gereproduceerd voor een kleine ruimte- en tijdschaal. Patronen en volumes zijn in dezelfde orde grootte.

Uit een vergelijking van de reproductienauwkeurigheid tussen de korte-termijnberekening van 1998-2002 (4 jaar) en de langjarige berekeningen van 1965-2002 (38 jaar) en 1860-1970 (110 jaar) volgt dat simulaties van lange termijn tijdsperiodes zinvolle resultaten leveren op estuarium schaal. Voor ongeveer 2/3 van de roosterpunten kan goed voorspeld worden of er erosie dan wel sedimentatie optreedt. Dit percentage is vrij constant over de tijd van de run van 4 jaar, 38 jaar en 110 jaar. De regressiecoëfficiënt (bodemverandering model versus bodemverandering meting) voor de gehele Westerschelde blijft 0.26 voor zowel de korte (4 jr) als de lange termijn (38 jr). Voor de 110 jaar hindcast is de regressiecoëfficiënt 0.52. De Brier-Skill Score (BSS) is een maat voor hoe goed de erosie- en sedimentatiepatronen van model en meting op elkaar liggen. Voor de korte termijn berekening wordt een BSS van 0.19 verkregen over de gehele Westerschelde, de validatie van 1965-2002 geeft een BSS van 0.03 en de 110 jaar validatie geeft een BSS van 0.45 op estuarium schaal. Dit betekent dat de berekening van 110 jaar de beste reproductie geeft. Het blijkt uit deze berekening dat het model geschikt is om grootschalige patronen te reproduceren op lange termijn. De morfologische veranderingen worden in de tijd groter en daarmee neemt de voorspelbaarheid toe (de modelfout wordt relatief kleiner).

Geconcludeerd kan worden dat het model opgetreden morfologische ontwikkelingen grotendeels kan reproduceren voor grootschalige fenomenen op lange tijdschalen (110 jaar hindcast) en kleinschalige fenomenen op korte tijdschalen (plaatrandstorting).

## 10.2 Aanbevelingen

Voor een verdere verbetering van de resultaten wordt aanbevolen om met meerdere sedimentfracties te gaan rekenen. Gezien de gevoeligheid van de uitkomsten voor de instelling van de  $d_{50}$  en bijbehorende valsnelheid lijkt er nog winst te halen bij het meenemen van meerdere fracties. Ook het meenemen van de slibfractie lijkt een verbetering te kunnen geven. Slib komt vooral voor in de intergetijdengebieden en zorgt voor een cohesief gedrag in de bodem bij voldoende slib. De intergetijdengebieden eroderen te veel in het model voor de langjarige berekening. Cohesief gedrag van de platen en slikken zorgt er voor dat er minder erosie plaatsvindt.

- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2012. Update niet-erodeerbare lagen kartering Westerschelde, Memo A28; U12072/1630/GD
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis 2013a. Probleemanalyse zandwinning in het Schelde-estuarium. Rapport G10; 1630/U11296/BvL/F
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013b. Actualisatie Delft3D model van de Westerschelde, Rapport A27.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013c. Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde, Rapport G2.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013d. Influence morphology on tide and sand transport, Rapport G4.
- Dam, G., 2006. Morfodynamische berekeningen van de Westerschelde met behulp van FINEL2d, eindrapport, GD/06119/1339, Svašek Hydraulics
- Dam, G., Van der Wegen, M., Roelvink, D., 2013. Long-term performance of process-based models in estuaries. Proceedings of Coastal Dynamics conference, Arcachon, France.
- Friedrichs, C.T., Aubrey, D.G., 1988. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. Estuarine, Coastal and Shelf Science 27, 521-545.
- Gruijters, S.H. L. L., Schokker, J., Veldkamp J. G., 2004. Kartering moeilijk erodeerbare lagen in het Schelde estuarium, TNO rapport 03-213-B1208.
- Haecon, 2006. Actualisatie van de zandbalans van de Zee- en Westerschelde.
- Kuijper, K., Kaaij van der, K., Goede, de E., 2006. LTV-O&M actieplan voor morfologisch onderzoek modelinstrumentarium - Delft3D, WL Delft Hydraulics, rapport Z3950
- Male, K van der, 2004. Moeilijk erodeerbare lagen in de Westerschelde: koppeling met bodemligging vanaf 1800, Werkdocument RIKZ
- Maximova, T.; Ides, S.; Vanlede, J.; De Mulder, T.; Mostaert, F., 2009a. Verbetering 2D randvoorwaardenmodel. Deelrapport 3: Kalibratie bovenlopen. WL Rapporten, 753\_09. Flanders Hydraulics Research, Antwerp, Belgium
- Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F., 2009b. LTV O&M thema Veiligheid - Deelproject 1: Verbetering hydrodynamisch NEVLA model ten behoeve van scenario-analyse. WL Rapporten, 756\_05. Flanders Hydraulics Research & Deltares: Antwerp, Belgium
- Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F., 2009c. Verbetering randvoorwaardenmodel. Deelrapport 4: Extra aanpassingen Zeeschelde. WL Rapporten, 753\_09. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium
- Nederbragt, G., Liek, G.J., 2004. Beschrijving zandbalans Westerschelde en monding, Rapport RIKZ/2004.020.



## BIJLAGE A: MORFODYNAMISCH MODEL FINEL2D

### A.1: General

FINEL2d is a 2DH numerical model based on the finite elements method and is developed by Svašek Hydraulics. The following sections describe the governing equations of the FINEL2d model. This appendix was partly taken from Dam et. al. (2007).

### A.2: Hydrodynamic module

The depth-integrated shallow water equations are the basis of the flow module. For an overview on shallow water equations see Vreugdenhil (1994).

The model equations are the continuity equation:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

the x-momentum balance:

$$\frac{\partial Du}{\partial t} + \frac{\partial Du^2}{\partial x} + \frac{\partial Duv}{\partial y} + f_c Dv + gD \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_{x,b} + \frac{1}{\rho} \tau_{x,w} + \frac{1}{\rho} \tau_{x,r} = 0, \quad (2)$$

and the y-momentum balance:

$$\frac{\partial Dv}{\partial t} + \frac{\partial Duv}{\partial x} + \frac{\partial Dv^2}{\partial y} - f_c Du + gD \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_{y,b} + \frac{1}{\rho} \tau_{y,w} + \frac{1}{\rho} \tau_{y,r} = 0. \quad (3)$$

where:

|                |                                         |                      |
|----------------|-----------------------------------------|----------------------|
| u              | =depth averaged velocity in x-direction | [m/s]                |
| v              | =depth averaged velocity in y-direction | [m/s]                |
| h              | =water level                            | [m]                  |
| zb             | =bottom level                           | [m]                  |
| D              | =water depth                            | [m]                  |
| fc             | =Coriolis coefficient                   | [1/s]                |
| g              | =gravitational acceleration             | [m/s <sup>2</sup> ]  |
| ρ              | =density of water                       | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| τ <sub>b</sub> | =bottom shear stress                    | [N/m <sup>2</sup> ]  |
| τ <sub>w</sub> | =wind shear stress                      | [N/m <sup>2</sup> ]  |
| τ <sub>r</sub> | =radiation stress                       | [N/m <sup>2</sup> ]  |

In addition to the effect of advection and pressure gradients, external forces like the Coriolis force, bottom shear stress, wind shear stress and radiation stress due to surface waves can be taken into account. It is noted that turbulent shear stresses are not taken into account: the application is therefore restricted to advection dominated flows only.

As a solution method, the discontinuous Galerkin method is adopted (Hughes, 1987) in which the flow variables are taken constant in each moment. This method has advantages in dealing with drying elements.



As the momentum equations contain first order derivatives in space, they can be written as:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = \mathbf{H} \quad (4)$$

where:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uD \\ vD \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} uD & vD \\ u^2D + \frac{1}{2}gh^2 & uvD \\ uvD & v^2D + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\rho}\tau_{x,tot} - f_c vD - gDi_{b,x} \\ \frac{1}{\rho}\tau_{y,tot} + f_c uD - gDi_{b,y} \end{pmatrix} \quad (5)$$

in which  $\tau_{tot,x}$  and  $\tau_{tot,y}$  are summations of the external stresses in x- and y-direction respectively, while  $i_{b,x}$  and  $i_{b,y}$  are the bed level gradients in x- and y-direction respectively.

The equation can be integrated over an element resulting in:

$$\int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma_e} \mathbf{F} \mathbf{n} d\Gamma = \int_{\Omega_e} \mathbf{H} d\Omega, \quad (6)$$

where  $\Omega_e$  denotes an element,  $\Gamma_e$  the associated element boundary, while  $\mathbf{n}$  is the outward pointing vector normal to  $\Gamma_e$ .

The problem is now reduced to the determination of the fluxes  $\mathbf{F}$  along the boundaries. As the variables are determined at the elements and not at the sides, the flux  $\mathbf{F}$  is not known beforehand, but involves the solution of a local Riemann problem. An approximate Riemann solver according to Roe (Glaister, 1993) is applied. This method guarantees strict mass and momentum conservation, but suffers from some numerical diffusion in stream-wise direction. An explicit time integration scheme is used. As this method restricts the time step, the time step is controlled automatically for optimum performance.

A special problem in shallow waters like for example estuaries is the drying and flooding of large areas during a tidal cycle. A discontinuous discretization is used in combination with an explicit time-stepping. In this way this flooding and drying of the elements can be treated relatively easily. If an element tends to dry, the corresponding characteristic wave is partially reflected from this element which guarantees mass conservation.

### A.3: Sediment transport module

FINEL2d uses the following sediment balance equation for the evolution of the bed level:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

In which  $z_b$  [m] is the bed level and  $(q_x, q_y)$  [m<sup>2</sup>/s] are the components of the sediment flux in x- and y-direction respectively.

The applied sediment transport formula is the Engelund-Hansen formula (Engelund-Hansen, 1967):

$$q_{t,c} = \frac{0.05u^5}{(s-1)^2 g^{0.5} d_{50} C^3}$$

In which:

|           |                                                   |                       |
|-----------|---------------------------------------------------|-----------------------|
| $q_{t,c}$ | = volumetric current-related total load transport | [m <sup>2</sup> /s]   |
| $u$       | = depth averaged velocity                         | [m/s]                 |
| $C$       | = Chézy coefficient                               | [m <sup>1/2</sup> /s] |
| $s$       | = specific density (= $\rho_s / \rho$ )           | [-]                   |
| $\rho_s$  | = density sand                                    | [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| $\rho$    | = density water                                   | [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| $g$       | = gravitational acceleration                      | [m/s <sup>2</sup> ]   |
| $d_{50}$  | = median particle size of bed material            | [m]                   |

A time lag effect is introduced in the model according to Gallapatti & Vreugdenhil (1985). First a dimensionless equilibrium concentration is calculated:

$$c_e = \frac{S}{D\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (8)$$

where  $c_e$  is equilibrium concentration [-] and  $S$  the magnitude of the equilibrium sand transport [m<sup>2</sup>/s] according to Engelund and Hansen.

The concentration  $c$  [-] is then calculated according from:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{T_A} [c_e(t) - c(t)] \quad (9)$$

In which  $T_A$  is a characteristic timescale [s].

Equation 9 shows that if the concentration is lower than the equilibrium concentration erosion will occur ( $dc/dt > 0$ ). If the concentration is higher than the equilibrium concentration sedimentation will occur ( $dc/dt < 0$ ). The coefficient  $T_A$  characterises the time needed for the adjustment of the concentration and is defined as  $T_A = h/w_s$ ; where  $w_s$  [m/s] is the settling velocity of the sand particles. In relative shallow areas the time scale is small and the concentration almost immediately adjusts to the equilibrium concentration.

## References

Dam, G., Blik, A.J., Labeur, R.J., Ides, S. Plancke, Y., 2007, Long term process based morphological model of the Western Scheldt Estuary, Proceedings of the 5th River, Coastal and Estuarine Morphodynamics conference, the Netherlands, p1077-1084.

Engelund, F., Hansen, E., 1967, A monograph on sediment transport in alluvial channels, Teknik Forlag, Copenhagen.

Gallappatti, R., Vreugdenhil, C. B., 1985, A depth-integrated model for suspended sediment transport. Journal of Hydraulic Research 23, p. 359-277.

Glaister, P. 1993. Flux difference splitting for open-channel flows, Int. J. Num. Meth. Fluids, 16, p. 629-654

Hughes, T.J.R, 1987, The finite element method, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Vreugdenhil, C.B., 1994, Numerical methods for shallow water flow, Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht (IMAU), Utrecht University, The Netherlands

## **BIJLAGE B: RESULTATEN FINEL3D SIMULATIE PUT VAN BORSSELE**

### **B.1: Inleiding**

In hoofdstuk 5 van deze rapportage worden met behulp van zowel FINEL2d als FINEL3d stroommetingen in de Put van Borssele gereproduceerd. Deze bijlage gaat in op een deel van de resultaten van de simulatie met FINEL3d.

### **B.2: Resultaten**

Omdat de stroming met behulp van een driedimensionaal model gemodelleerd is, kan ook naar de variatie van de stroming over de verticaal gekeken worden. Daartoe worden de meetresultaten en modelresultaten voor zowel maximale vloedstroming als maximale ebstroming vergeleken. In Fig. 1 tot en met Fig. 16 worden voor deze twee tijdstippen de meetresultaten en de FINEL3d resultaten gegeven. Zowel de stroomsnelheid als de stroomrichting is in de figuren terug te vinden. In de figuren met de FINEL3d resultaten is zoveel mogelijk dezelfde schaal gebruikt als de schaal waarin de meetresultaten zijn gepresenteerd.

Fig. 1 presenteert de stroomsnelheden langs raai 4, de raai in de langsdoorsnede van de Put van Borssele. Wanneer het bovenste en onderste paneel worden vergeleken, valt op dat in beide panelen de maximale stroomsnelheid zich in het onderste deel van de waterkolom bevindt. De door het model geproduceerde stroomsnelheden zijn echter iets lager dan de gemeten stroomsnelheden.

In Fig. 2 geeft de stroomrichting. In de modelresultaten draait de stroming enigszins bij de bodem, in tegenstelling tot het patroon dat de meting laat zien, waar de stroomsnelheid over de diepte weinig varieert.

De gemeten stroomsnelheid in raai 3, raai 2 en raai 1 (de raaien dwars op de Put van Borssele) zijn vergelijkbaar en worden gepresenteerd in de bovenste panelen van Fig. 3, Fig. 5 en Fig. 7. Aan de westzijde van de raaien treden relatief lage snelheden op. De hoogste snelheden treden op aan de oostzijde, maar nemen nog verder naar het oosten snel af. In de modelresultaten, te zien in de onderste panelen van Fig. 3, Fig. 5 en Fig. 7, is een vergelijkbaar patroon zichtbaar. De hoogst voorkomende stroomsnelheden komen in tegenstelling tot de meetresultaten zeer lokaal echter over de gehele waterkolom voor. Daarbij zijn de stroomsnelheden iets te laag.

De gemeten stroomrichting voor raai 3, raai 2 en raai 1 is weergegeven in de bovenste panelen van Fig. 4, Fig. 6 en Fig. 8. In de meting is aan het oostelijke uiteinde van de raaien een richtingsverandering te zien. In de modelresultaten, gepresenteerd in de onderste panelen van Fig. 4, Fig. 6 en Fig. 8, is eveneens een richtingsverandering zichtbaar. De stroomrichting in de modelresultaten aan de uiterste oostzijde van de raaien wijkt echter af van de gemeten stroomrichting. In Figuur 5.11 is te zien dat er op deze plaats een kleine neer ontstaat, die deze afwijking veroorzaakt.

In Fig. 9 worden de gemeten en gemodelleerde stroming tijdens maximale ebstroming weergegeven. Wanneer de gemeten stroomsnelheid langs raai 4 met de gemodelleerde stroomsnelheid langs raai 4 wordt vergeleken, zie Fig. 9, valt direct op dat de hoogste stroomsnelheden in metingen aan het oppervlak voorkomen, maar in de modelresultaten in het midden van de waterkolom.

De oorzaak van het verschil wordt duidelijk wanneer de dwarsdoorsneden van de Put van Borssele beschouwd worden. De gemeten drie dwarsdoorsneden, gepresenteerd in de bovenste panelen van Fig. 11, Fig. 13 en Fig. 15, vertonen hetzelfde patroon. De hoogste snelheden treden in het bovenste deel van de waterkolom op en naar het oosten toe nemen de stroomsnelheden sterk af. In de modelresultaten, te zien in de onderste panelen van Fig. 11, Fig. 13 en Fig. 15, nemen de stroomsnelheden eveneens naar het oosten toe af. Echter, de stroomsnelheden nemen, in tegenstelling tot wat de meetresultaten tonen, alleen bovenin de waterkolom af. De hoogste stroomsnelheden treden in het oostelijk deel dus onderin de waterkolom op, ook daar waar de langsdoorsnede, zie Fig. 9, de hierboven besproken dwarsdoorsneden kruist.

Wanneer de stroomrichting wordt beschouwd, kan gesteld worden dat de meetresultaten en modelresultaten goed overeen komen. Bij beide is de stroomrichting onderin de waterkolom iets noordelijker georiënteerd dan bovenin de waterkolom. Ook de verandering van stroomrichting aan de uiterste oostzijde van de dwarsdoorsneden komt overeen. Deze is echter wat uitgesprokener in de modelresultaten.

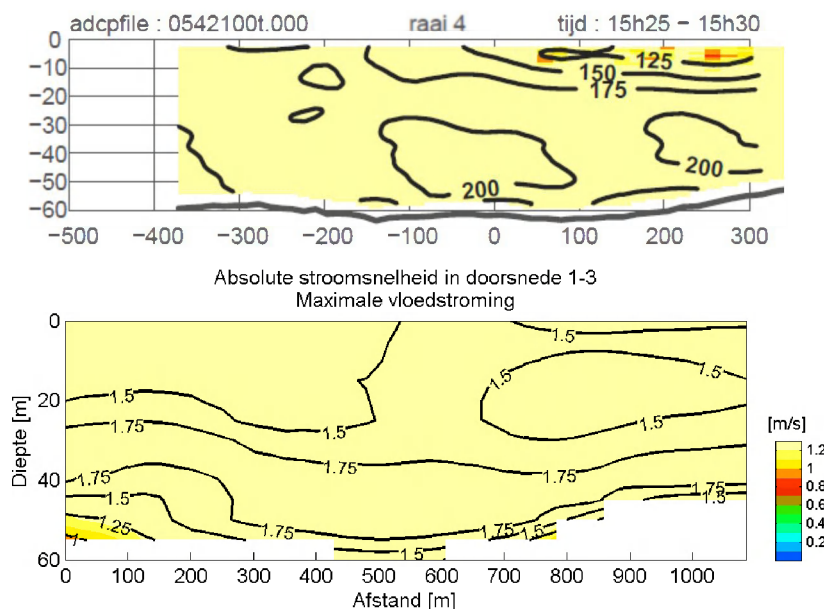


Fig. 1: Gemeten absolute stroomsnelheid (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde absolute stroomsnelheid (onder) tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011 langs raai 4.

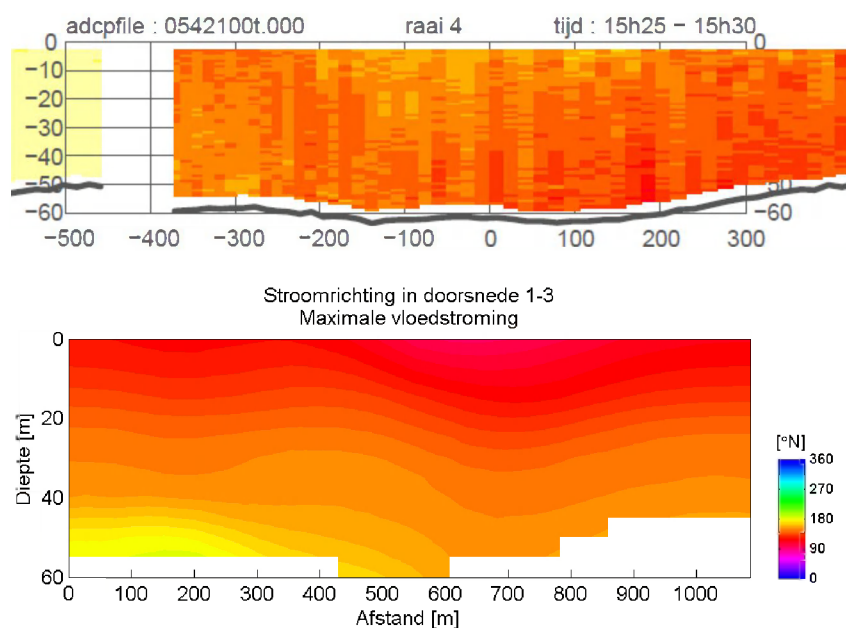


Fig. 2: Gemeten stroomrichting (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde stroomrichting (onder) tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011 langs raai 4.

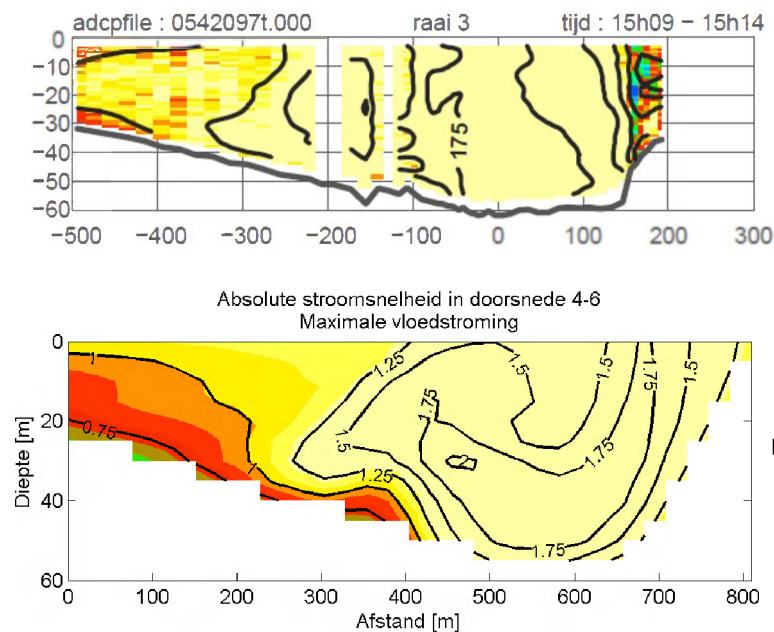


Fig. 3: Gemeten absolute stroomsnelheid (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde absolute stroomsnelheid (onder) tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011 langs raai 3.

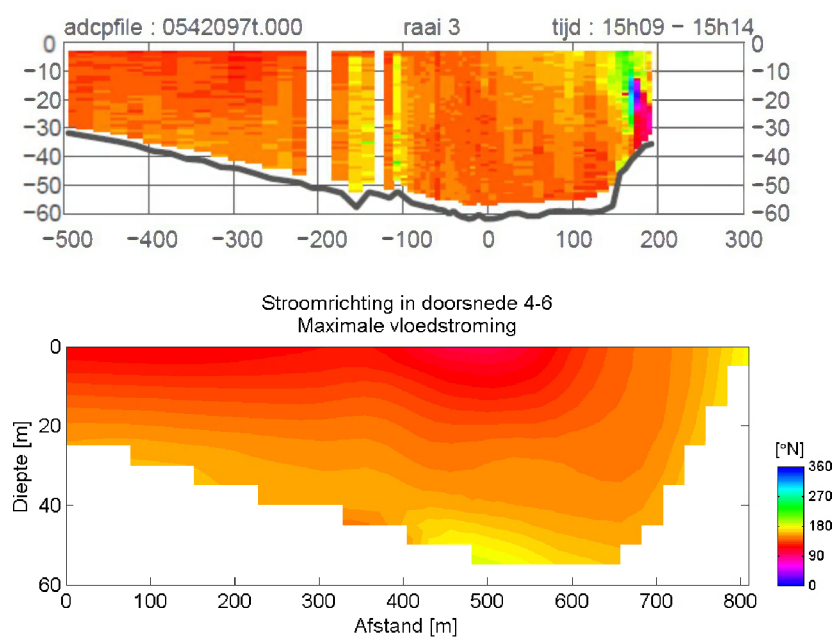


Fig. 4: Gemeten stroomrichting (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde stroomrichting (onder) tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011 langs raai 3.

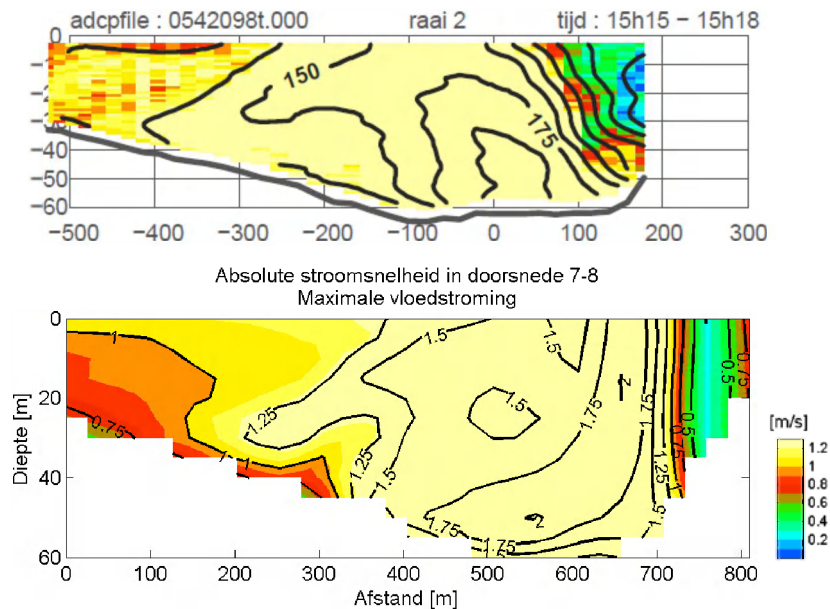


Fig. 5: Gemeten absolute stroomsnelheid (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde absolute stroomsnelheid (onder) tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011 langs raai 2.



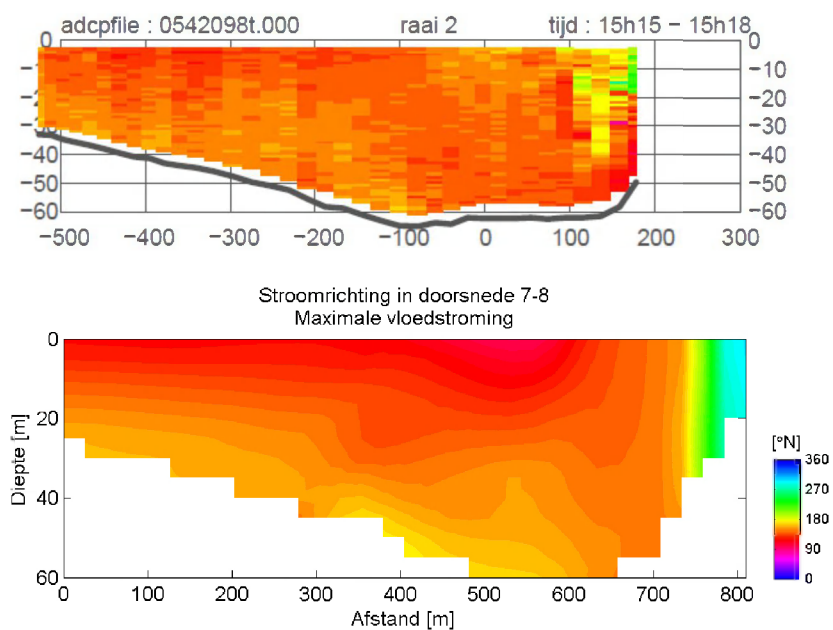


Fig. 6: Gemeten stroomrichting (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde stroomrichting (onder) tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011 langs raai 2.

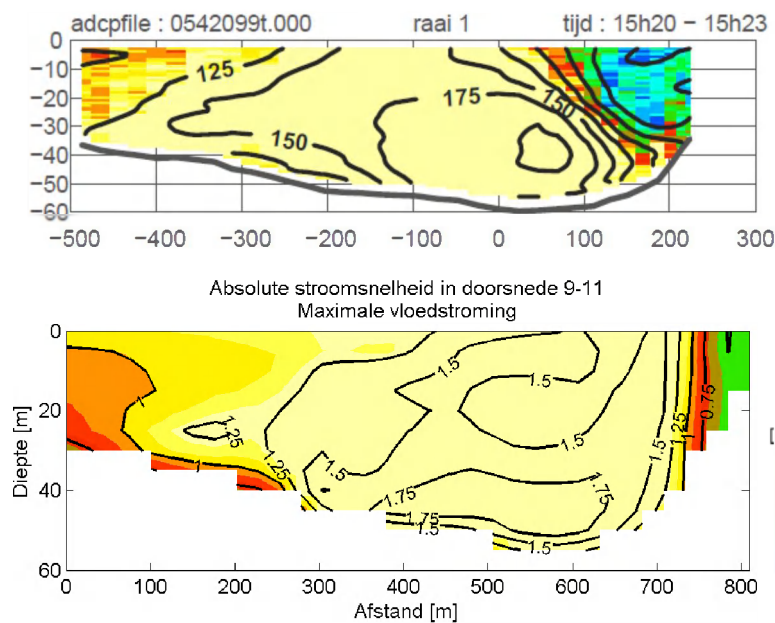


Fig. 7: Gemeten absolute stroomsnelheid (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde absolute stroomsnelheid (onder) tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011 langs raai 1.

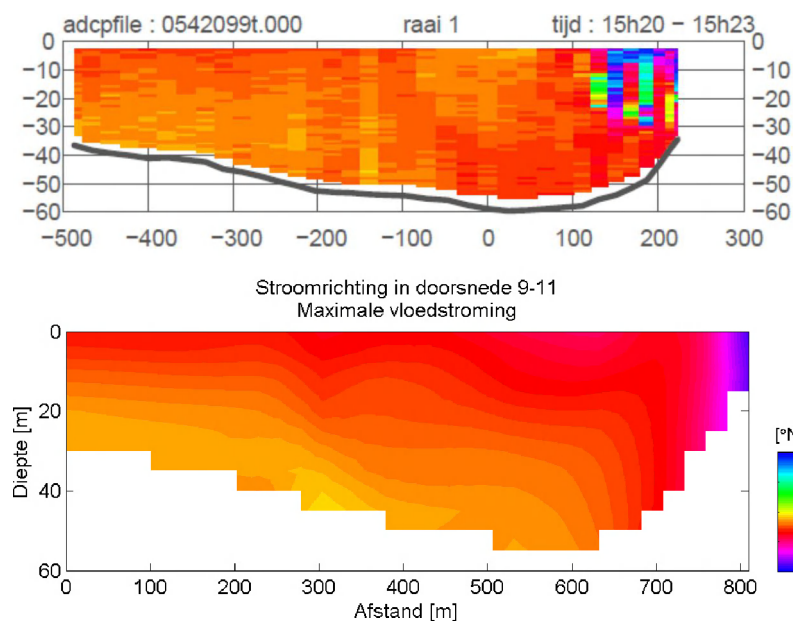


Fig. 8: Gemeten stroomrichting (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde stroomrichting (onder) tijdens maximale vloedstroming op 28 november 2011 langs raai 1.

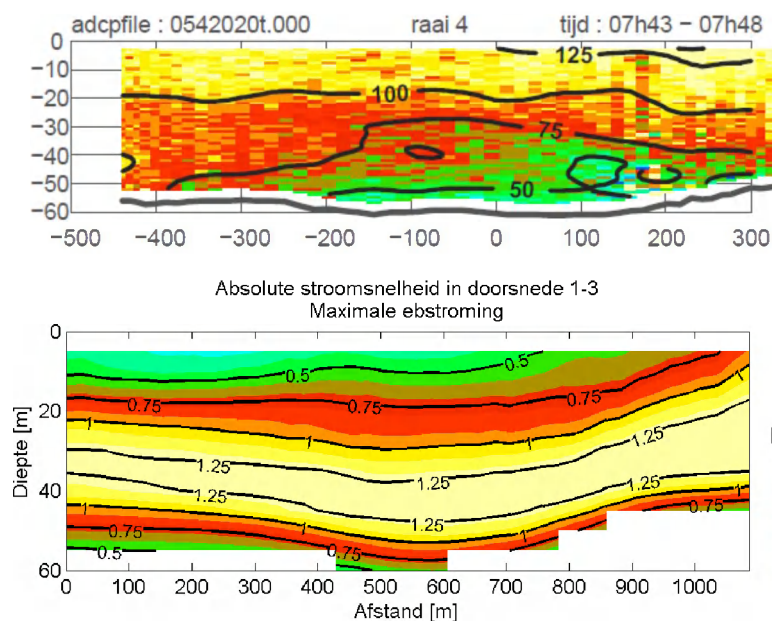


Fig. 9: Gemeten absolute stroomsnelheid (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde absolute stroomsnelheid (onder) tijdens maximale ebstroming op 28 november 2011 langs raai 4.

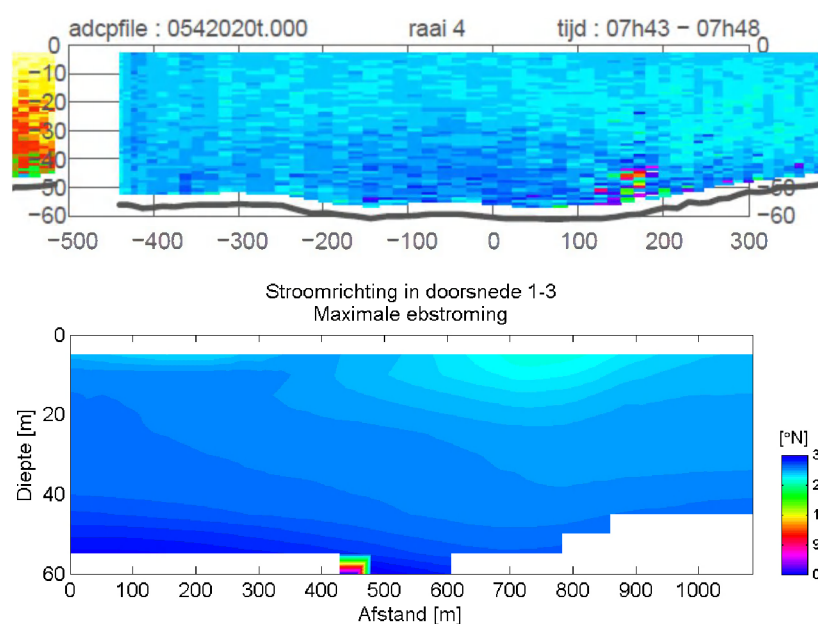


Fig. 10: Gemeten stroomrichting (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde stroomrichting (onder) tijdens maximale ebstroming op 28 november 2011 langs raai 4.

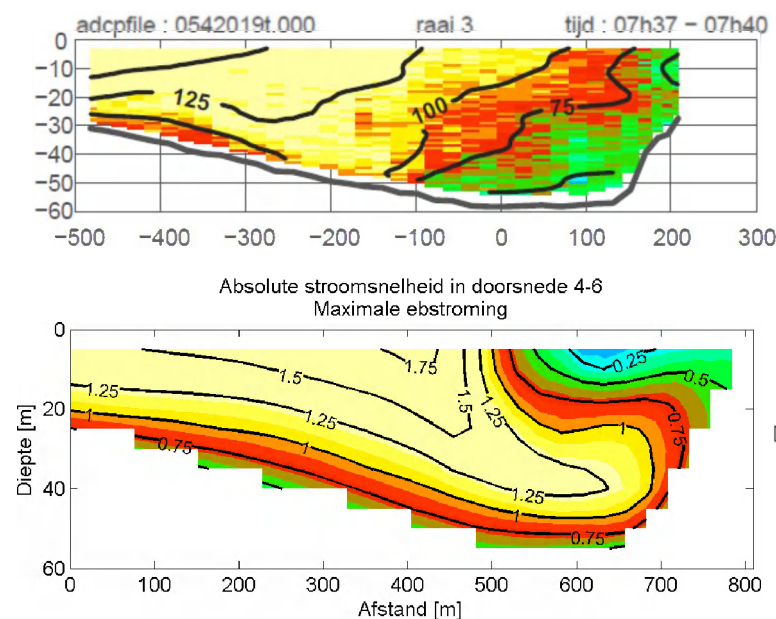


Fig. 11: Gemeten absolute stroomsnelheid (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde absolute stroomsnelheid (onder) tijdens maximale ebstroming op 28 november 2011 langs raai 3.

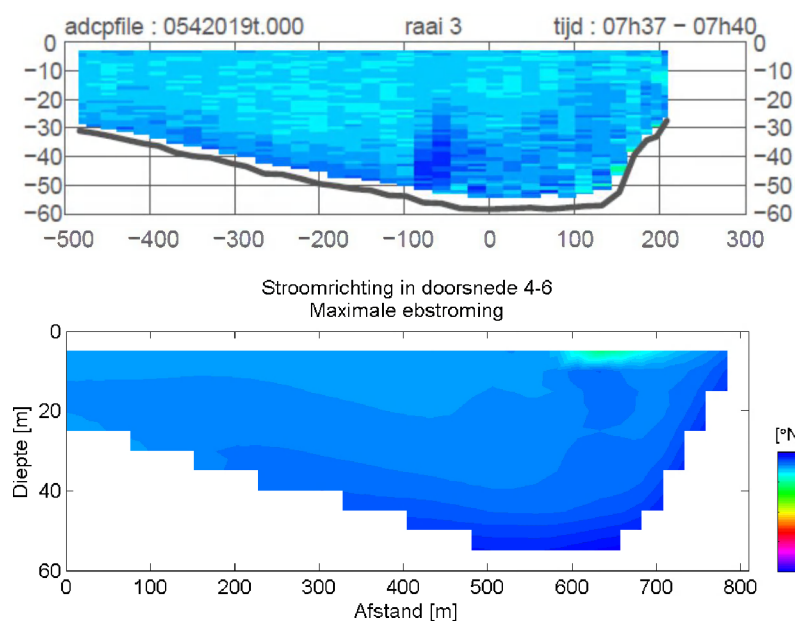


Fig. 12: Gemeten stroomrichting (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde stroomrichting (onder) tijdens maximale ebstroming op 28 november 2011 langs raai 3.

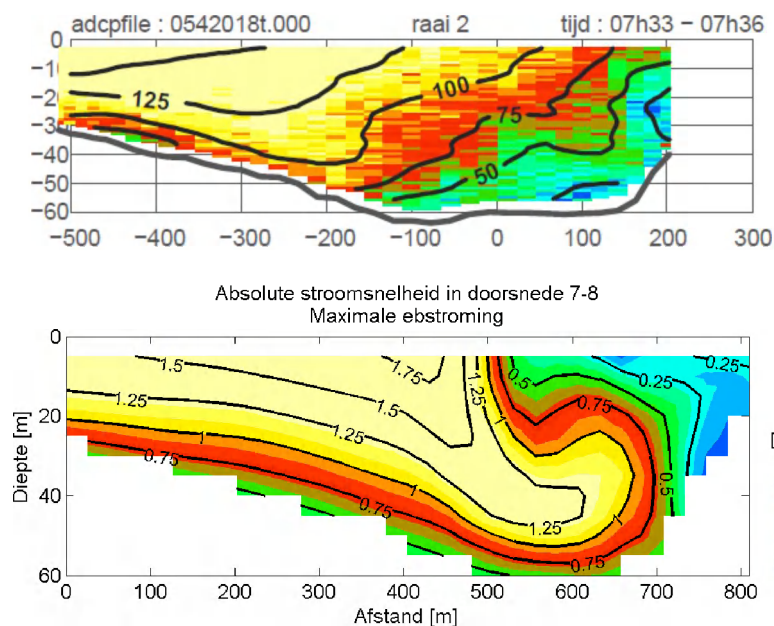


Fig. 13: Gemeten absolute stroomsnelheid (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde absolute stroomsnelheid (onder) tijdens maximale ebstroming op 28 november 2011 langs raai 2.

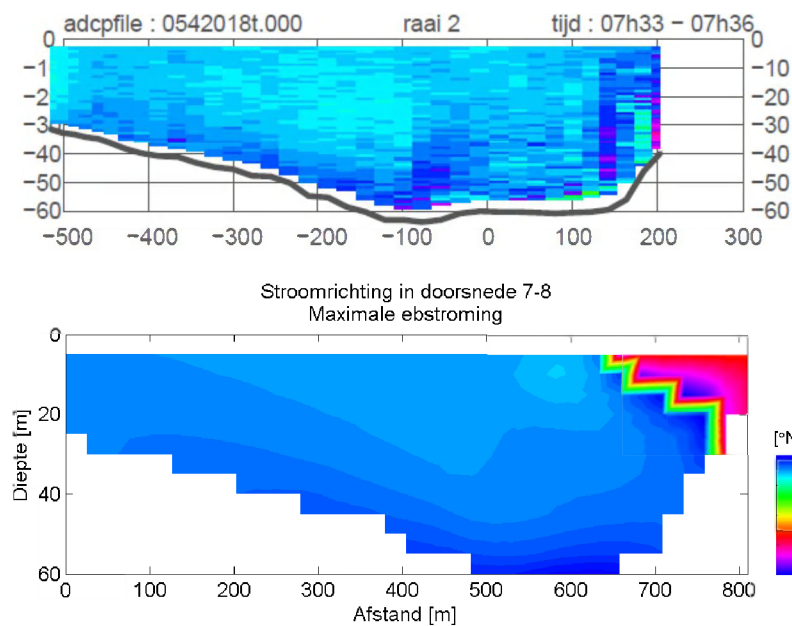


Fig. 14: Gemeten stroomrichting (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde stroomrichting (onder) tijdens maximale ebstroming op 28 november 2011 langs raai 2.

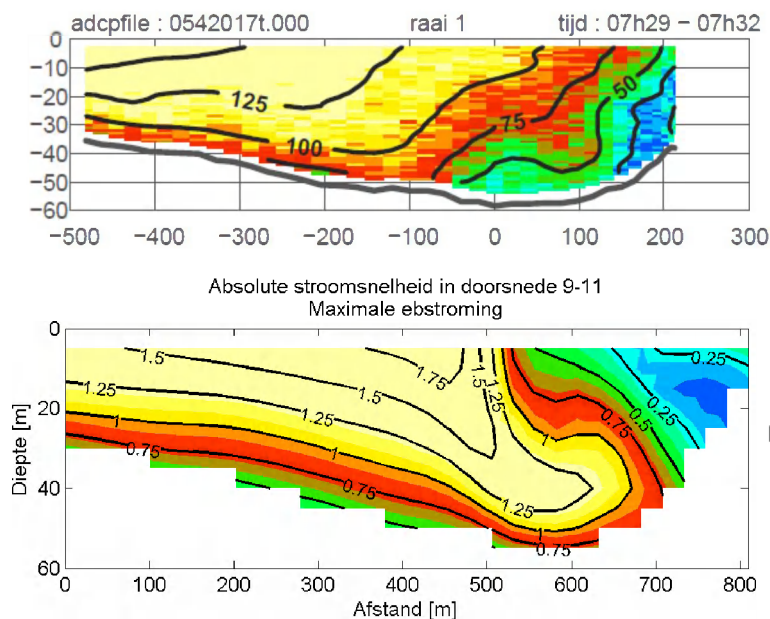


Fig. 15: Gemeten absolute stroomsnelheid (boven) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde absolute stroomsnelheid (onder) tijdens maximale ebstroming op 28 november 2011 langs raai 1.



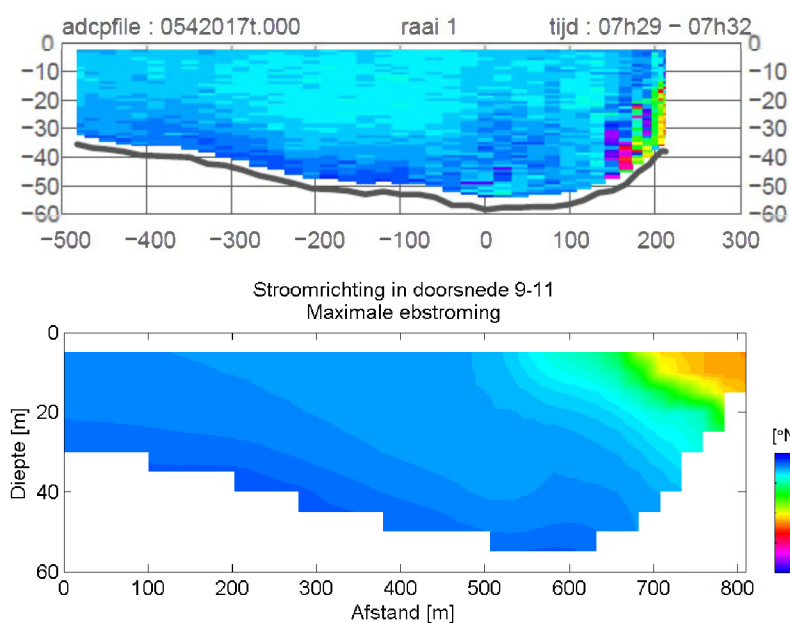


Fig. 16: Gemeten stroomrichting (onder) en met behulp van FINEL3d gemodelleerde stroomrichting (onder) tijdens maximale ebstrooming op 28 november 2011 langs raai 1.



COASTAL, HARBOUR AND RIVER CONSULTANTS